



**Titre:** Conception conjointe des nomenclatures et de la chaîne logistique  
Title: pour une famille de produits : outils d'optimisation et analyse

**Auteur:** Bertrand Baud-Lavigne  
Author:

**Date:** 2012

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Baud-Lavigne, B. (2012). Conception conjointe des nomenclatures et de la chaîne  
Citation: logistique pour une famille de produits : outils d'optimisation et analyse [Ph.D.  
thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/953/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/953/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Bruno Agard, & Bernard Penz  
Advisors:

**Programme:** Doctorat en génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION CONJOINTE DES NOMENCLATURES ET DE LA CHAÎNE  
LOGISTIQUE POUR UNE FAMILLE DE PRODUITS : OUTILS D'OPTIMISATION ET  
ANALYSE

BERTRAND BAUD-LAVIGNE  
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL ET  
EN COTUTELLE AVEC L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR  
(GÉNIE INDUSTRIEL)  
OCTOBRE 2012



**POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL**

**UNIVERSITÉ DE  
GRENOBLE**

## **THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE**

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : le 6 janvier 2005 - 7 août 2006

et de

**PHILOSOPHIÆ DOCTEUR DE L'ÉCOLE  
POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

Spécialité : **Génie Industriel**

**préparée dans le cadre d'une cotutelle entre  
l'Université de Grenoble et l'École Polytechnique de  
Montréal**

Présentée par

**Bertrand BAUD-LAVIGNE**

Thèse dirigée par **Bernard PENZ** et **Bruno AGARD**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP (Grenoble Science  
pour la Conception et l'Optimisation de la Production)**  
dans l'École Doctorale **I-MEP<sup>2</sup> (Ingénierie - Matériaux  
Mécanique Énergétique Environnement Procédés Production)**

et au sein de l'École Polytechnique de Montréal  
dans le **département de Mathématiques et Génie industriel**

# **Conception conjointe des nomenclatures et de la chaîne logistique pour une famille de produits : outils d'optimisation et analyse**

Thèse soutenue publiquement le **25 octobre 2012**,  
devant le jury composé de :

**Bruno AGARD**

Professeur, École Polytechnique de Montréal, Directeur de thèse

**Jean-Marc FRAYRET**

Professeur, École Polytechnique de Montréal, Président

**Khaled HADJ-HAMOU**

Maître de conférences, Institut polytechnique de Grenoble, Examineur

**Jacques LAMOTHE**

Professeur, École des Mines d'Albi, Rapporteur

**Marc PAQUET**

Professeur, École de technologie supérieure de Montréal, Rapporteur

**Bernard PENZ**

Professeur, Institut polytechnique de Grenoble, Directeur de thèse

*Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /  
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP*



UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

CONCEPTION CONJOINTE DES NOMENCLATURES ET DE LA CHAÎNE  
LOGISTIQUE POUR UNE FAMILLE DE PRODUITS : OUTILS D'OPTIMISATION ET  
ANALYSE

présentée par : BAUD-LAVIGNE Bertrand  
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor  
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., président

M. AGARD Bruno, Doct., membre et directeur de recherche

M. PENZ Bernard, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. HADJ-HAMOU Khaled, Ph.D., membre

M. LAMOTHE Jacques, Doct., membre

M. PAQUET Marc, Ph.D., membre

## REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord exprimer mes plus profonds remerciements à Jacques LAMOTHE et Marc PAQUET d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci à Jean-Marc FRAYRET de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Enfin, je remercie Khaled HADJ-HAMOU pour avoir examiné cette thèse. Tous vos retours ont été constructifs ; ils m'ont aidé à améliorer mon travail et à prendre le recul nécessaire.

Je tiens spécialement à remercier mes directeurs de thèse pour leur accompagnement durant ces quatre années.

Merci Bernard. Tout d'abord, tu as grandement influencé mes choix en me donnant envie par tes cours, tes discussions et le travail à tes côtés de continuer dans ce domaine et dans la recherche en général. Tu as toujours été disponible pour moi, malgré ton emploi du temps chargé. Aussi bien pour travailler que pour me conseiller dans mes démarches, et avec des conseils à la fois pertinents et réalistes.

Merci Bruno. Tu as tout fait pour que ma thèse se passe au mieux, en me rassurant et m'encourageant quand j'en avais besoin. Même si ce n'a pas toujours été agréable, tu as bien su pointer mes maladresses et mes manques pour m'obliger à aller plus loin. Le travail avec toi est très efficace et j'ai beaucoup apprécié ta grande réactivité.

Mes remerciements vont également à Olivier MICHEL et Bruno JOUREL qui m'ont accueilli dans leur entreprise Reyes Construction et m'ont permis de démarrer cette thèse avec une problématique qui a du sens. Samuel BASSETTO a été l'instigateur de cette collaboration et je lui en suis reconnaissant.

Je n'oublie pas l'école de Génie Industriel de Grenoble INP, ses enseignants et son administration. À double titre. De m'avoir donné une formation en me permettant de découvrir des domaines passionnants. De m'avoir ensuite donné l'opportunité d'enseigner pendant quatre ans dans de très bonnes conditions. Je remercie particulièrement Jeanne DUVALLET, en tant que directrice et collègue, pour m'avoir donné ma chance et pour ses précieux conseils. Merci à Michel TOLLENAERE pour son accompagnement et sa confiance. Merci à tous mes collègues de l'école, moniteurs et permanents avec qui j'ai eu le plaisir de travailler à un moment ou à un autre, entre autre Olivier BRIANT, Hadrien CAMBAZARD, Julien DARLAY, Lilia GZARA, Irageal JOLY, Pierre LEMAIRE, Grégory MOREL, Alexandre SALSCH. Merci aux étudiants. Merci au CIES de m'avoir donné du recul sur le métier d'enseignant. Merci à Daniel LLERENA qui a eu une grande (bonne) influence sur mon parcours universitaire.

Je tiens également à remercier le personnel administratif et scientifique de l'École Polytechnique de Montréal, et particulièrement tous ceux qui m'ont permis de mener à bien cette

co-tutelle ; notamment Jean DANSEREAU, directeur des études supérieures, Pierre BAPTISTE, directeur du département de mathématiques et de génie industriel, et le personnel administratif dont Suzanne GUINDON, Diane BERNIER et Joanne RICHARD. Merci à mes collègues de m’avoir bien accueilli parmi eux.

Je remercie tous mes collègues du laboratoire G-SCOP pour la bonne humeur qui m’a permis d’aller travailler tous les jours avec plaisir. Merci spécialement à son directeur, Yannick FREIN, de m’avoir donné d’excellentes conditions de travail. Je suis reconnaissant envers toute l’équipe technique et administratif du laboratoire de nous faciliter grandement toutes nos démarches et pour leur sympathie. Ensuite, je ne citerai personne pour ne pas doubler la taille de mon manuscrit. Je pense néanmoins fortement à certains ”gens du labo” qui sont de vrais amis, aux GRELOUX en tout genre – compagnons de midi-bastille, de grimpe, de montagne . . . –, aux membres de l’A-DOC et plus généralement à tous ceux avec qui j’ai passé du temps. Cette aventure, autant professionnelle que personnelle, a été si plaisante grâce à vous.

Pour terminer, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien, et pour s’être efforcé au fil des années de vouloir comprendre mon sujet de thèse. Merci enfin à mes correctrices.

## RÉSUMÉ

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire porte sur des méthodes d'optimisation pour la conception conjointe des nomenclatures d'une famille de produits et de sa chaîne logistique. Dans les milieux industriels comme dans les services, le contexte commercial très concurrentiel oblige les entreprises à diversifier leurs offres pour mieux répondre aux demandes de leurs clients. La gestion de cette diversité est alors une problématique centrale : comment proposer une large variété de produits pour satisfaire les besoins des clients tout en maîtrisant les coûts de production, d'inventaire et de logistique ? Les réponses à problème relèvent des disciplines habituellement séparées : la conception des produits, la production et la logistique. Si une majorité des approches existantes traitent ces problématiques de façon séquentielle, l'interdisciplinarité apparaît cependant comme un élément essentiel dans la gestion de la diversité. L'objectif de cette thèse est de chercher comment améliorer les interactions entre la conception de familles de produits et l'optimisation des réseaux logistiques en proposant une étape de conception intermédiaire et en développant des outils mathématiques, avec un intérêt particulier porté aux problématiques de développement durable.

## ABSTRACT

This PhD thesis addresses the problem of joint bills-of-materials and supply chain design for a product family. In industry as well as in services, the highly competitive business environment obliges companies to diversify their offers to meet the demands of their customers. Then, managing diversity is a central issue: how to offer a wide variety of products to meet customer needs while controlling costs of production, inventory and logistics? Answers to these problems are usually in separate disciplines: product design, production and logistics. If most of existing approaches tackle these problems sequentially, interdisciplinarity, however, appears as a key aspect of diversity management. The objective of this thesis is to investigate how to improve the interaction between product families design and supply chain optimization and to develop mathematical tools, with a focus on sustainable development.



## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ . . . . .	vi
ABSTRACT . . . . .	vii
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	viii
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	xi
LISTE DES FIGURES . . . . .	xii
LISTE DES ANNEXES . . . . .	xiv
CHAPITRE INTRODUCTION GÉNÉRALE . . . . .	1
<b>I CONTEXTE</b>	<b>3</b>
CHAPITRE 1 PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE . . . . .	4
1.1 Contexte général . . . . .	4
1.2 Les domaines d'étude . . . . .	5
1.2.1 Les méthodes de conception de produits permettant la diversification de l'offre . . . . .	5
1.2.2 Conception de la chaîne logistique . . . . .	5
1.3 Les enjeux de l'étude . . . . .	8
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART . . . . .	9
2.1 Les liens entre conception d'une famille de produits et de la chaîne logistique .	9
2.1.1 Conception d'une famille de produits en considérant les contraintes de production . . . . .	9
2.1.2 Conception de la chaîne logistique en considérant les contraintes produits	11
2.1.3 Conception concourante produit – chaîne logistique . . . . .	13
2.2 Prise en compte de contraintes environnementales . . . . .	15
2.3 Internationalisation des marchés . . . . .	16
CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE . . . . .	18
3.1 Description de l'étude . . . . .	18

3.1.1	Justifications et hypothèses de travail . . . . .	18
3.1.2	Objectifs généraux et spécifiques . . . . .	19
3.2	Méthodologie . . . . .	19
3.2.1	Étude de la pertinence de concevoir simultanément une famille de produits et sa chaîne logistique . . . . .	19
3.2.2	Présentation détaillée du modèle . . . . .	20
3.2.3	Formulation du problème de conception conjointe en programmation linéaire mixte et analyse du modèle . . . . .	22
3.2.4	Développement d'un outil d'aide à la décision . . . . .	24
3.3	Contributions . . . . .	25

## II CONTRIBUTIONS

27

### CHAPITRE 4 MUTUAL IMPACTS OF PRODUCT STANDARDIZATION AND SUPPLY CHAIN DESIGN . . . . .

4.1	Introduction . . . . .	28
4.2	Literature review on product and supply chain design . . . . .	30
4.3	Supply chain design and standardization possibilities . . . . .	32
4.3.1	Problem description . . . . .	32
4.3.2	Mathematical formulation to design the supply chain . . . . .	34
4.3.3	Relevance of joint standardization and supply chain optimization . . . . .	35
4.4	Experiments with standardization and relocation . . . . .	38
4.4.1	Design of experiments . . . . .	38
4.4.2	Case study 1: Same facilities . . . . .	41
	Variation of the fixed cost . . . . .	41
	Variation of the transportation cost . . . . .	42
	Variation of the demand . . . . .	43
4.4.3	Case study 2: Differentiated facilities . . . . .	44
	Variation of the labour cost . . . . .	44
	Variation of the fixed cost . . . . .	45
	Variation of the transportation cost . . . . .	46
	Variation of the demand . . . . .	47
	Mutual impacts of demand and fixed cost on standardization strategies . . . . .	48
	Mutual impacts of demand and transportation cost on standardization strategies . . . . .	49
4.5	Conclusion and further research . . . . .	50

CHAPITRE 5	SIMULTANEOUS PRODUCT FAMILY AND SUPPLY CHAIN DESIGN: AN OPTIMIZATION APPROACH . . . . .	52
5.1	Introduction . . . . .	52
5.2	An optimization model for joint product and supply chain design . . . . .	54
5.2.1	Model description . . . . .	54
5.2.2	Mathematical formulation . . . . .	56
5.3	Experiments . . . . .	60
5.3.1	Design of experiments . . . . .	60
5.3.2	Exact resolution . . . . .	64
5.3.3	Heuristics based on LP rounding . . . . .	65
5.3.4	Resolution of larger instances . . . . .	67
5.4	Conclusion . . . . .	69
CHAPITRE 6	ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS IN JOINT PRODUCT AND SUPPLY CHAIN DESIGN OPTIMIZATION . . . . .	70
6.1	Introduction . . . . .	70
6.2	Integrating carbon footprints into joint product and supply chain design . . . . .	71
6.3	Experiments . . . . .	77
6.3.1	Design of experiments . . . . .	77
6.3.2	Cost function minimization with carbon emission constraint . . . . .	79
6.3.3	Carbon emission function minimization with maximal cost constraint . . . . .	80
6.3.4	Global analysis . . . . .	81
6.4	Conclusion . . . . .	82
<b>III</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>84</b>
CHAPITRE 7	CONCLUSION . . . . .	85
CHAPITRE 8	DISCUSSION ET PERSPECTIVES . . . . .	87
RÉFÉRENCES	. . . . .	91
ANNEXES	. . . . .	101

## LISTE DES TABLEAUX

Table 4.1	Differences in cost of the production alternatives . . . . .	37
Table 4.2	Results for two data sets . . . . .	38
Table 4.3	Product characteristics . . . . .	39
Table 4.4	Variation of parameters . . . . .	40
Table 4.5	Case study 1 - Demand characteristics . . . . .	41
Table 4.6	Case study 1 - Production unit characteristics . . . . .	41
Table 4.7	Case study 2 - Production units characteristics . . . . .	44
Table 5.1	Decision variables (DV) and their associated costs. . . . .	58
Table 5.2	Case study one characteristics . . . . .	61
Table 5.3	Case study two characteristics. Used to check case study one results . .	61
Table 5.4	Instance parameters . . . . .	62
Table 5.5	Mean resolution time for exact resolution with case study one (Table 5.2) in proportion to the reference time (on 20 instances) . . . . .	64
Table 5.6	Mean resolution time for exact resolution with case study two (Table 5.3) in proportion to the reference time (on 20 instances) . . . . .	65
Table 5.7	Mean resolution time for heuristic resolution with case study one (Table 5.2) in proportion to the reference time and gap in comparison to the reference solution (on 20 instances) . . . . .	66
Table 5.8	Mean resolution time for heuristic resolution with case study two (Table 5.3) in proportion to the reference time and gap in comparison to the reference solution (on 20 instances) . . . . .	66
Table 5.9	Large instance parameters . . . . .	67
Table 5.10	Number of feasible and best solutions for Cplex and heuristic resolutions with case study one (Table 5.2) and gap in comparison to the best upper bound (on 20 instances, 6mn max per resolution) . . . . .	68
Table 5.11	Number of feasible and best solutions for Cplex and heuristic resolutions with case study two (Table 5.3) and gap in comparison to the best upper bound (on 20 instances, 6mn max per resolution) . . . . .	68
Table 6.1	Decision variables (DV), their associated costs and carbon emissions. .	73
Table 6.2	Case study characteristics. . . . .	78
Table 6.3	Instance parameters . . . . .	78

## LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Illustration de nomenclatures et des possibilités de substitution. . . . .	21
Figure 3.2	Représentation de la chaîne logistique. . . . .	22
Figure 4.1	Bill-of-materials for the products $P$ and $P'$ . . . . .	33
Figure 4.2	Solution pattern of the problem . . . . .	33
Figure 4.3	Flow of assembly $p$ on site $i$ . . . . .	35
Figure 4.4	Standardization possibilities . . . . .	39
Figure 4.5	Gain of standardization and supply chain configuration - Fixed cost variation . . . . .	42
Figure 4.6	Gain of standardization and supply chain configuration - Transportation variation . . . . .	42
Figure 4.7	Gain of standardization and supply chain configuration - Demand variation . . . . .	43
Figure 4.8	Gain of standardization and supply chain configuration - Labour cost variation ( $D = 3000$ ) . . . . .	45
Figure 4.9	Gain of standardization and supply chain configuration - Fixed cost variation ( $D = 5000$ ) . . . . .	46
Figure 4.10	Gain of standardization and supply chain configuration - Transportation cost variation ( $D = 2500$ ) . . . . .	46
Figure 4.11	Gain of standardization and supply chain configuration - Demand variation . . . . .	48
Figure 4.12	Demand and fixed cost variation . . . . .	48
Figure 4.13	Demand and transportation cost variation . . . . .	50
Figure 5.1	Bill-of-materials and substitution illustrations. . . . .	54
Figure 5.2	Schematic supply chain network. . . . .	56
Figure 5.3	Product generator. . . . .	63
Figure 6.1	Case study: the supply chain. . . . .	77
Figure 6.2	Extra Commonality Index (ECI) according to $C_{max}$ variation ( $C_{max} = \alpha C_{min}$ ). . . . .	80
Figure 6.3	Cost optimization under carbon emission constraint variation. . . . .	81
Figure 6.4	Extra Commonality Index (ECI) according to $Z_{max}$ variation ( $Z_{max} = \alpha Z_{min}$ ). . . . .	82
Figure 6.5	Carbon emission optimization under cost constraint variation. . . . .	83
Figure A.1	Chaîne logistique générique de Reyes Constructions. . . . .	102

Figure A.2	Type de solution attendue par Reyes Constructions. . . . .	102
Figure A.3	Page d'accueil du logiciel. . . . .	103
Figure A.4	Entrée des caractéristiques des produits. . . . .	103
Figure A.5	Bilan de la solution. . . . .	104

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A	PARTENARIAT INDUSTRIEL AVEC REYES CONSTRUCTIONS	. 101
----------	---	-------

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans les milieux industriels comme dans les services, le contexte commercial très concurrentiel oblige les entreprises à diversifier leurs offres pour mieux répondre aux demandes de leurs clients Pine (1993). La gestion de cette diversité est alors une problématique centrale : comment proposer une large variété de produits pour satisfaire les besoins des clients tout en maîtrisant les coûts de production, d'inventaire et de logistique ? Les réponses à ce problème relèvent de disciplines habituellement séparées : la conception des produits, la production et la logistique. Si une majorité des approches existantes traitent ces problématiques de façon indépendante – le plus souvent séquentiellement – l'intégration des processus apparaît cependant comme un élément essentiel dans la gestion de la diversité.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer les interactions entre la conception de familles de produits et l'optimisation des réseaux logistiques en proposant une démarche intégrée de conception des produits et de leur chaîne logistique. Nous nous intéressons également à la problématique de la prise en compte des impacts environnementaux des produits dans la conception simultanée des produits et de leur chaîne logistique.

La thèse est partagée en trois parties. La première partie, composée des chapitres 1, 2 et 3, présente le contexte de l'étude.

Le premier chapitre positionne le contexte de ce travail et formalise les enjeux de l'étude. Les domaines d'études principaux sont la conception des familles de produits et la conception de la chaîne logistique.

Le deuxième chapitre synthétise dans un état de l'art les travaux antérieurs mêlant la conception des produits et de la chaîne logistique. Les problématiques entourant le développement durable et l'internationalisation des marchés sont également abordées.

Le troisième chapitre détaille les hypothèses qui ont été posées dans ce travail, explicite la nature et les aboutissants des modèles proposés. La méthodologie suivie y est présentée. Enfin, nos contributions académiques sont énoncées.

La seconde partie, qui contient les chapitres 4, 5 et 6, présente les contributions proposées dans cette thèse. Chacun de ces chapitres est constitué d'un article soumis et/ou accepté en revue. Ils peuvent être lus indépendamment. Ces contributions forment un tout qui visent à justifier l'intérêt du problème traité, proposer des méthodes pour le traiter et élargir son champs par une application. Les contributions spécifiques de chaque article au problème général seront expliqués dans la section 3.3, qui montrera que chaque article complète les



autres autour de la même problématique en s'intéressant chacun à une partie du problème.

Le quatrième chapitre Baud-Lavigne *et al.* (2012b)<sup>1</sup> étudie la pertinence de concevoir simultanément les produits et leur chaîne logistique, du point de vue de l'optimisation des coûts.

Le cinquième chapitre Baud-Lavigne *et al.* (2012c)<sup>2</sup> présente un modèle d'optimisation conjointe et s'intéresse à la résolution de celui-ci. Un intérêt particulier est porté à l'analyse de l'origine de la complexité du modèle et aux méthodes de résolution heuristique proposées.

Le sixième chapitre Baud-Lavigne *et al.* (2012a)<sup>3</sup> met en œuvre nos propositions pour analyser des décisions liées à des contraintes environnementales.

Dans la dernière partie, la conclusion synthétise les propositions qui ont été présentées. Puis, les perspectives découlant de ces travaux terminent ce manuscrit.

---

<sup>1</sup>Publié dans International Journal of Production Economics

<sup>2</sup>Soumis à International Journal of Production Economics

<sup>3</sup>Soumis à Computers & Industrial Engineering

# **PARTIE I**

## **CONTEXTE**

## CHAPITRE 1

### PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE

#### 1.1 Contexte général

Le sujet traité dans cette thèse émane d'un partenariat industriel entre Reyes Constructions et le laboratoire G-SCOP. Cette étude, décrite en Annexe A, traite des problématiques d'allocation de la production entre des sites proches des clients et des sites à bas-coûts.

Ce questionnement est élargi dans le cadre de cette thèse afin de se positionner dans le contexte plus général de la globalisation des échanges et de la production dans les industries d'assemblage.

La globalisation des échanges a entraîné une forte concurrence entre les entreprises sur la plupart des marchés. Dès lors, les clients deviennent de plus en plus exigeants en termes de prix et de fonctionnalités. Il est alors indispensable pour les entreprises de fournir à chaque client le produit dont il a besoin et au meilleur prix. Ceci implique deux aspects : la personnalisation des produits et la réduction des coûts de production. Ces deux composantes peuvent paraître paradoxales, car les économies d'échelle, qui correspondent à la réduction des coûts unitaires de production lorsque des volumes de production augmentent, sont un des leviers de la réduction des coûts de production. La différenciation des produits peut se faire sur la qualité des produits (différenciation verticale) ou sur les fonctionnalités (différenciation horizontale). Or, la personnalisation des produits induit une plus grande diversité des produits proposés aux clients et donc la production d'un plus grand nombre de séries avec des volumes réduits, ce qui ne permet pas *a priori* les économies d'échelle. Un équilibre est à trouver entre la diversité des produits offerts et leurs coûts induits en production.

Si la demande s'est globalisée, il en est de même pour la production. Une première question est de savoir comment construire un réseau logistique afin de prendre en compte les avantages (coûts, capacités de production, compétences, proximité avec les autres acteurs de la chaîne logistique, réactivité) de tous les territoires (zone géographique où l'entreprise peut s'implanter et/ou un marché existe). Une entreprise répondant à une demande globale doit mettre en adéquation son réseau de production afin de satisfaire aux exigences de coût et de délai de ses clients. Lorsque l'entreprise fait face à une demande globalisée, la question est de savoir comment choisir les sites de production et comment répartir la production entre ces sites. Une seconde problématique est le recours à la délocalisation, c'est-à-dire à la production dans des zones géographiques à faible coût de main d'œuvre et éloignées des clients.

## 1.2 Les domaines d'étude

### 1.2.1 Les méthodes de conception de produits permettant la diversification de l'offre

La personnalisation de masse est un ensemble de méthodes, détaillées par Pine (1993), cherchant à offrir une grande variété de produits finis en conservant les avantages de la production de masse. Une partie des concepts étudiés doit être intégrée dès la conception des produits, comme :

**La conception modulaire**, qui consiste à assembler le produit à partir de modules fonctionnels Kusiak et Huang (1996).

**L'extensibilité**, qui consiste à concevoir le produit de sorte à ce que des évolutions soient plus facilement intégrables.

**La commonalité**, qui cherche à réutiliser des composants ou sous-assemblages d'autres produits existant Fixson (2007).

En phase d'industrialisation, il est encore possible d'agir avec la différenciation retardée Lee et Tang (1997) Su *et al.* (2005), en personnalisant le plus tard possible les produits dans le processus de fabrication.

Enfin, en production, la diversité peut être gérée grâce aux gammes génériques d'assemblage Stadzisz et Henrioud (1998). Ces techniques offrent des méthodes permettant de concevoir des familles de produits répondant mieux aux besoins des clients tout en minimisant les surcoûts. Ceci ouvre de nouvelles possibilités d'optimisation des familles de produits qui seront détaillées en Section 2.1.

### 1.2.2 Conception de la chaîne logistique

Pour Pirard (2005), la logistique a peu à peu changé de fonction au sein des entreprises, passant de la gestion des flux interne à un processus au cœur de l'entreprise, pour devenir une activité à part entière. Depuis les années 90, la notion de chaîne logistique est de plus en plus usitée pour dénoter le caractère intégré de cette activité et le fait qu'elle ne se limite plus aux flux internes, mais à tous les flux allant des fournisseurs aux clients. Pirard synthétise les diverses définitions de la chaîne logistique par celle-ci : *La chaîne logistique est un réseau d'entités, géographiquement dispersées, impliquées dans la chaîne de création de valeur et de vente de produits, qui collaborent afin d'assurer l'approvisionnement, la production et la distribution tout en maximisant leur profit et ce, sous contrainte de satisfaire les clients finaux*

(i.e. livrer les produits souhaités au bon endroit, au bon moment, en bonne quantité et en bonne qualité).

La conception de la chaîne logistique regroupe des décisions concernant l'organisation des opérations permettant la production et la distribution des produits, du fournisseur jusqu'au client.

Ces décisions sont classées en trois catégories selon l'horizon de leur impact : stratégiques, tactiques et opérationnelles. La définition de ces horizons peut varier selon les industries et les modèles considérés. Cordeau *et al.* (2006) proposent la répartition suivante :

**Les décisions d'ordre stratégique** impactent le long terme de l'entreprise. Ces décisions impliquent des investissements importants qu'il n'est pas possible de remettre en cause, comme par exemple le choix des sites de production et des entrepôts – tous les investissements lourds en général.

**Les décisions d'ordre tactique** ont un impact sur le moyen terme ( $< 1$  an). Exemple : allocation des produits aux sites de production, choix des fournisseurs, flot des produits entre les sites...

**Les décisions d'ordre opérationnel** concernent le court terme et doivent être prises sur un horizon de l'ordre d'un mois. Elles incluent la planification des opérations au jour le jour comme l'organisation des livraisons, l'ordonnancement de la production et la gestion des stocks.

Riopel *et al.* (2005) décrivent l'ensemble de ces décisions qui peuvent être prises au sein d'une chaîne logistique. Un intérêt particulier est porté à leur classification et aux liens existants entre ces décisions.

Klibi *et al.* (2010) présentent trois composantes indissociables participant à la construction du profit d'une industrie manufacturière : les revenus, les coûts et les dépenses de capital. Le concept important concernant les revenus est celui de gagnant de commande ("order winner"), c'est-à-dire les critères permettant d'augmenter sa part de marché : la variété de produit, le prix, la qualité et la fiabilité, les délais de livraison et leur fiabilité, l'agilité, la couverture du marché et enfin l'empreinte environnementale. Les coûts proviennent des processus d'approvisionnement, de production, de stockage, de logistique, et enfin de vente. Les dépenses de capitaux représentent tous les investissements déployés dans le réseau logistique ainsi que leur valeur marchande.

Les modèles mathématiques d'optimisation déterministes sont couramment utilisés pour prendre ces décisions, notamment la programmation linéaire en nombre entier. Les premiers modèles étudiés ont été ceux de localisation des unités. Ce sont des modèles simplifiés ne

prenant pas en compte la complexité des produits et de leur production. Ils sont basés sur la contradiction entre les dépenses de capitaux, vues comme des coûts fixes, et les coûts inhérents au fonctionnement du réseau – principalement production, stockage et logistique – vus comme des coûts variables. Ils se sont intéressés principalement à l'évaluation et la minimisation de ces coûts en considérant un réseau logistique très simple permettant un travail théorique poussé. Depuis les années 1990, ces modèles ont été enrichis afin de modéliser plus finement la réalité, par la prise en compte de nouveaux paramètres, de nouvelles variables de décisions et d'autres objectifs. Ces problèmes sont classés selon les critères suivants :

- nombre d'échelons : les échelons considérés généralement sont (d'amont en aval) les fournisseurs, les sites de production, les centres de distribution, les commerces et les clients. D'autres échelons peuvent intervenir, par exemple dans le cadre de la chaîne logistique inverse ;
- mono/multi-produits : un seul ou plusieurs produits peuvent être considérés ;
- mono/multi-périodes : l'optimisation peut se faire sur une période de temps pour laquelle les données sont agrégées, ou sur plusieurs périodes de temps ;
- déterministe / stochastique : les paramètres peuvent être déterministes ou suivre une loi de probabilité.

Shapiro (2001) présente des modélisations établies pour une grande variété de problématiques liées à la chaîne logistique. Meixell et Gargeya (2005) et Melo *et al.* (2009) proposent les revues de la littérature les plus récentes et complètes à ce jour pour les modèles déterministes. Beamon (1999b) présente des façons de mesurer la performance de la chaîne logistique selon sa configuration.

Nous nous intéressons principalement aux modèles mathématiques déterministes sans considérer les risques. Klibi *et al.* (2010) présentent une revue de la littérature et abordent le traitement du risque dans la conception de la chaîne logistique. Les risques dus aux perturbations ont deux causes possibles : l'incertitude sur les informations et le manque d'information. La notion d'incertitude peut aussi être définie comme la situation où il est impossible d'évaluer le degré de certitude, et le risque est alors une situation où l'incertitude peut être évaluée. Le phénomène le plus facilement traitable est le caractère aléatoire de certains paramètres comme la demande, les prix, les coûts des composants, le taux de change... Si l'on peut caractériser ces paramètres par des distributions de probabilités, les méthodes de conception déterministes peuvent être adaptées en établissant plusieurs scénarios en fonction des valeurs que peuvent prendre les paramètres. En cas d'incertitude profonde, il est impossible d'estimer des probabilités d'occurrence des scénarios. La conception de la chaîne logistique doit alors

faire en sorte que les solutions proposées soit robustes, c'est-à-dire qu'elles soient le moins possible influencées par le scénario effectif. La robustesse est définie par Klibi *et al.* (2010) comme une mesure de la flexibilité utile maintenue par une décision permettant de garder des marges de manœuvre pour les choix futurs. Elle se base sur une optimisation de la solution à partir de scénarios pré-établis mais n'en privilégie aucun afin que la solution soit performante quel que soit le scénario. Une revue récente des modèles stochastiques est proposée par Peidro *et al.* (2009). Les modèles d'optimisation sont nombreux, citons Mohammadi Bidhandi et Mohd Yusuff (2011) qui intègrent des paramètres suivant une loi statistique connue pour une prise de décision aux niveaux stratégiques et tactiques, et Shimizu *et al.* (2011) qui s'intéressent à la conception robuste des réseaux logistiques en utilisant des scénarios et une optimisation multi-objectifs.

Enfin, une approche intégrant les notions de qualité dans la conception des chaînes logistiques est proposée par Das (2011).

### 1.3 Les enjeux de l'étude

Le problème posé est la gestion de la diversité de produits en production. Les réponses à ce problème concernent des disciplines habituellement bien séparées : la conception produit, la production et la logistique. Les activités couvertes se situent en phase d'industrialisation de la famille de produits. Les choix de conception ne sont pas remis en cause et les questions se concentrent sur la meilleure façon d'industrialiser ces produits en considérant comme leviers les questions relatives à la chaîne logistique et au degré de commonalité des produits. Les questions relatives au processus de fabrication ne sont pas abordées.

La question de recherche est :

Comment concevoir simultanément une chaîne logistique et une famille de produits à forte diversité, en étant compétitif et attractif grâce à une bonne exploitation de ses avantages concurrentiels en production et en distribution, dans un environnement déterministe?

## CHAPITRE 2

### ÉTAT DE L'ART

#### 2.1 Les liens entre conception d'une famille de produits et de la chaîne logistique

Cette revue de la littérature s'intéresse aux études portant sur les liens entre la conception produit et la conception de la chaîne logistique dans les modèles mathématiques déterministes. Pour Copacino (1997), il n'y a pas de réelle prise en compte des interactions entre les produits et la chaîne logistique dans la littérature. Cependant, le besoin d'intégration entre les deux processus de conception est mis en évidence par Riopel *et al.* (1998) :

“Le défi du 21<sup>e</sup> siècle consiste à intégrer la logistique et le design des produits et procédés de façon à optimiser la production”

De notre point de vue, les approches pertinentes pour traiter le problème de la conception conjointe produit – chaîne logistique sont à la fois l'intégration des contraintes logistiques dans la conception des produits et, à l'inverse, la prise en compte des spécificités des produits dans la conception des réseaux logistiques. Les approches intégrées seront présentées en dernière partie.

##### 2.1.1 Conception d'une famille de produits en considérant les contraintes de production

La “Conception pour la logistique<sup>1</sup>” et la “Conception pour la gestion de la chaîne logistique<sup>2</sup>” (Dowlathshahi (1996)) sont un ensemble de méthodes et de règles pour prendre en compte les contraintes logistiques dans la conception des produits. Ces études ont mis en avant les bénéfices de concepts qualitatifs tels que la conception modulaire, la différenciation retardée et des règles comme la réduction du nombre de composants ou de références utilisés, et l'intégration des fournisseurs en amont des projets de conception, permettant une baisse des coûts liés au stockage et au transport des produits. Dowlathshahi (1999) propose une méthode mathématique pour prendre en compte ces contraintes logistiques. Les travaux de Koike (2005) montrent que les interactions entre la logistique et l'ingénierie ne permettent pas encore une bonne intégration.

---

<sup>1</sup>Design for Logistics (DFL)

<sup>2</sup>Design for Supply Chain Management (DFSCM)



Afin de réduire le nombre de composants et de sous-ensembles différents au sein d'une famille de produits, les concepteurs définissent des plates-formes produits. Ce sont des sous-ensembles du produit qui pourront être communs à toute ou une partie de la famille. Jiao *et al.* (2007) proposent un état de l'art sur la définition de ces plates-formes produits. Simpson *et al.* (2006) présentent plusieurs méthodologies et algorithmes permettant de définir ces plates-formes produits. Shafia *et al.* (2009) déterminent les plates-formes produits en analysant les impacts sur le temps de réponse de la chaîne logistique. Salvador *et al.* (2002) étudient plusieurs cas d'études afin de caractériser l'influences des processus de fabrication sur la modularité des produits.

Le degré de différenciation physique des produits est mesurable par les indices de commonalité. La commonalité est un concept exprimant le fait que les produits au sein d'une famille partagent un certain nombre de parties ou de composants identiques. Un degré de commonalité fort permet de réduire les coûts de conception et de production en augmentant notamment les économies d'échelle. Ceci est indispensable lorsqu'une entreprise veut offrir une forte diversité de produits. Les effets négatifs d'une forte commonalité sont que les produits peuvent ne pas être assez performants et différenciés du fait de ces contraintes. L'objectif est alors de rendre commune les parties à faible valeur ajoutée et de garder uniques celles contribuant à la différenciation fonctionnelle du produit. Plusieurs indices ont été proposés dans la littérature :

- Wacker et Treleven (1986) présentent les inconvénients de l'indice du degré de commonalité et proposent trois autres indices prenant en compte le coût des composants et les quantités demandés,
- Johnson et Kirchain (2010) proposent plusieurs métriques basées sur des calculs de réutilisations des pièces,
- Ramdas et Randall (2008) analysent l'impact de la commonalité sur la fiabilité des produits.

La diversité est un aspect très coûteux en production, car elle empêche de profiter des économies d'échelle. Briant et Naddef (2004) ont traité le problème de la gestion de la diversité en définissant parmi la famille de produits ceux à fabriquer et ceux à standardiser, la standardisation d'une fonction engendrant un surcoût. Pour ce problème NP-complet<sup>3</sup>, une méthode de résolution basée sur la relaxation lagrangienne est proposée. Les effets de la standardisation sur la demande sont mis en avant par Desai *et al.* (2001), qui analysent les impacts de la réduction de la diversité à la fois sur les coûts et sur le marché.

---

<sup>3</sup> Famille de problèmes pour laquelle il n'existe pas à ce jour d'algorithme de résolution en temps polynomial en la taille des entrées.

Lorsque la demande pour chaque variante de la famille de produits est connue et qu'elle doit être satisfaite, la question posée est de savoir quels modules définir afin d'assembler de façon efficiente les différentes fonctionnalités des produits. L'efficience est en général mesurée par le temps d'assemblage du produit final et par les coûts de production et des stocks induits. Agard *et al.* (2009) considèrent un nombre maximal de modules à utiliser et un algorithme génétique pour la résolution. da Cunha *et al.* (2007) et Agard et Penz (2009) ne limitent que le temps d'assemblage final et optimisent le coût de gestion des modules par des algorithmes basés sur un recuit simulé. Agard et Kusiak (2004) exploitent les données industrielles par des méthodes de data-mining pour déterminer les modules pertinents à fabriquer. Pour les cas où l'information sur la demande n'est pas parfaite, da Cunha (2004) a développé une méthodologie pour définir les produits semi-finis à produire pour stock. Enfin, Chakravarty et Balakrishnan (2001) proposent un modèle de choix des modules considérant les demandes endogènes, et analysent les différences lorsque le fournisseur des modules est un sous-traitant et lorsqu'il est intégré à l'entreprise.

### 2.1.2 Conception de la chaîne logistique en considérant les contraintes produits

Depuis une quinzaine d'année, la littérature sur la conception des chaînes logistiques s'est intéressée à intégrer des contraintes venant des produits par des modélisations prenant en compte les nomenclatures, par l'étude des particularités des produits et leurs effets sur la chaîne logistique, et par le développement de méthodes de résolution dédiées.

**Modélisation** L'intégration explicite des nomenclatures produits dans la conception de la chaîne logistique est récente. La première étude à notre connaissance est celle de Arntzen *et al.* (1995), qui présente un modèle multi-périodes et multi-produits en programmation linéaire mixte. Ce modèle est très complet, puisqu'il prend en compte les coûts fixes et variables de production, de stockage, de distribution par plusieurs modes possibles et enfin les taxes. Le critère d'optimisation est la minimisation, à la fois des coûts et des délais de réponses, les deux composantes étant agrégées avec une pondération.

Des problèmes similaires ont été étudiés plus récemment. Cordeau *et al.* (2006) et Paquet (2007) proposent des modélisations en programmation linéaire mixte pour concevoir une chaîne logistique multi-échelons et multi-produits en considérant les contraintes d'assemblages et des nomenclatures détaillées. Le premier considère plusieurs modes de transport, le second intègre le choix des technologies à implanter sur chaque site. Deux modèles multi-périodes sont recensés : Thanh *et al.* (2008) proposent des expérimentations poussées en utilisant un générateur d'instance complet, Paquet *et al.*

(2008) intègrent différents types de travailleurs. Dans tous ces modèles, les flux des produits sont modélisés par des contraintes de flots. D'autres modélisations ont été proposées par Bassett et Gardner (2010) (application industrielle), Lin *et al.* (2006) (accent sur le transport), Martel (2005) (intégration des problématiques industrielles : saisonnalité, importance des stock, ...), Melo *et al.* (2006) (approche générique), Mohammadi Bidhandi *et al.* (2009) (résolution par la décomposition de Benders et proposition d'une relaxation particulière), Naraharisetti *et al.* (2008) (approche centrée sur les investissements), Verter et Dasci (2002) (moyens de production flexibles).

**Effets des produits sur la chaîne logistique** Montreuil et Poulin (2005) proposent une modélisation de la chaîne logistique adaptée à la personnalisation de masse. Un cas d'étude sur ce modèle est présenté par Poulin *et al.* (2006). Salvador *et al.* (2004) analysent les conséquences du niveau de personnalisation des produits sur la chaîne logistique par des études empiriques. Ils montrent que le degré de personnalisation a un impact significatif sur la configuration de la chaîne logistique. Un autre modèle prenant en compte explicitement le degré de commonalité des produits et la différenciation retardée est proposé par Schulze et Li (2009b). Romeijn *et al.* (2007) incluent des stratégies de stocks de sécurité pour une chaîne logistique à deux échelons. Les particularités des produits dans le domaine de la foresterie sont étudiées par Vila *et al.* (2006) : l'activité est saisonnière et la qualité des matières premières varie.

**Méthodes de résolution** Parmi les méthodes de résolution exactes, la décomposition de Benders est efficace pour les problèmes mélangeant des variables entières et continues, si le problème peut se découper en deux problèmes distincts. Le principe est de définir deux problèmes : un problème maître et un problème esclave. Le problème maître est en général proche du problème originel, mais certaines contraintes ont été relaxées ou simplifiées. Après résolution, les variables pertinentes sont données au problème esclave qui est résolu à son tour. Si aucune solution n'est trouvée pour le problème esclave, c'est-à-dire que la solution du problème maître contraint trop le problème esclave, des coupes sont générées afin de supprimer cette solution du problème maître, qui est ensuite résolue. Ce processus est itératif. Dogan et Goetschalckx (1999) ont appliqué la décomposition de Benders à un modèle multi-périodes à trois échelons (fournisseurs, usines, entrepôts). Le problème maître est stratégique et considère la localisation des usines, leur taille ainsi que l'allocation des produits. Le problème esclave détermine les flux de produits entre les sites. La même décomposition est employée par Paquet *et al.* (2004) et par Cordeau *et al.* (2006). D'autres auteurs ont utilisé les décompositions de Benders sur des problèmes similaires : Cohen et Moon (1991) sur un modèle considérant

uniquement les problèmes d’allocations, Geoffrion et Graves (1974), Cordeau *et al.* (2008), CakIr (2009). La décomposition de Dantzig–Wolfe a été utilisée par Liang et Wilhelm (2008) qui montrent comment améliorer la convergence de la résolution. Cordeau *et al.* (2006) et Chouman *et al.* (2009) ont eu de très bons résultats en ajoutant des inégalités valides pour améliorer la relaxation linéaire utilisée dans le branch-and-bound. Les modélisations étant souvent complexes et avec un très grand nombre de variables, l’utilisation d’heuristique peut avoir de très bons résultats en pratique. Tang *et al.* (2004) décomposent le problème en deux sous-problèmes, le premier étant un problème de choix de production, le second s’occupant des questions de transport. Des heuristiques de résolution sont employées pour chaque sous-problème. Thanh *et al.* (2010) ont également développé une heuristique de rounding <sup>4</sup> et Manzini et Bindi (2009) mélangent des méthodes de résolution exactes, avec des heuristiques basées sur le regroupement et des stratégies de transport.

### 2.1.3 Conception concourante produit – chaîne logistique

Les travaux considérant la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique sont très récents. Appelqvist *et al.* (2004) justifient cela par le fait que le coût des produits est en général beaucoup plus élevé que les coûts de production et de logistique. Ainsi, il serait plus avantageux de donner la priorité à la conception du produit. Cependant, les coûts logistiques ont subi des changements importants ces dernières années.

En s’appuyant sur des cas d’étude comparant des projets où les produits sont modulaires avec d’autres projets où ils ne le sont pas, Lau *et al.* (2010) explicitent les relations entre la modularité des produits et l’intégration de la chaîne logistique. Lorsque les produits sont spécifiques, leur chaîne logistique est en général très intégrée quand celles des produits fortement modulaire sont plutôt faiblement coordonnées

Pour Hadj Hamou (2002), les processus de conception produit et chaîne logistique partagent quatre objectifs : réduire les délais, maîtriser la diversité, améliorer la qualité et diminuer les coûts.

Les approches existantes dans la littérature considèrent que les produits finaux sont à déterminer ou sont fixés. Lorsque la famille de produits n’est pas connue, l’objectif est de déterminer les fonctionnalités des produits qui vont être proposés en fonction des demandes des clients et des contraintes d’assemblage des produits, via les nomenclatures génériques. Lorsque les produits finaux sont fixés, leur demande est connue et la problématique est de déterminer la façon d’assembler les produits afin d’offrir les fonctionnalités désirées au

---

<sup>4</sup>Le rounding consiste à fixer des variables de décision entières en arrondissant la valeur de la solution obtenue par la relaxation linéaire.

meilleur coût de production et de distribution. Deux représentations ont été étudiées : la conception modulaire et les nomenclatures détaillées.

**Les nomenclatures génériques** permettent de modéliser les contraintes d’assemblage entre les différentes fonctionnalités des produits. Elles sont utilisées lorsque les besoins du marché sont connus pour chaque fonctionnalité mais pas pour des produits finis précis. La problématique est de définir la chaîne logistique en même temps que la famille de produits, c’est-à-dire l’ensemble des produits finaux proposés ainsi que leur nomenclature qui maximisent le profit de l’entreprise. Ce problème a été modélisé en programmation linéaire mixte par deux équipes :

- Zhang *et al.* (2010) utilisent leur modèle pour analyser les relations entre l’entreprise et ses fournisseurs,
- Lamothe *et al.* (2008) conduisent des expérimentations démontrant le rôle du coût du stockage dans des contextes de délocalisation.

**Conception modulaire.** Les travaux de El Hadj Khalaf (2009) représentent les produits par leurs fonctionnalités. Des fonctionnalités peuvent être regroupées dans des modules pour rentrer dans la composition des produits finaux, tous les assemblages étant autorisés. Dans le contexte de l’assemblage à la commande, les auteurs considèrent les cas où le temps d’assemblage final d’un produit doit être limité et où il n’est pas possible de fabriquer les produits finaux à l’avance. Leur objectif est alors de déterminer les modules à produire à l’avance, afin de permettre l’assemblage final dans le temps imparti. Le choix des sites de production des modules choisis est intégré au modèle. El Hadj Khalaf *et al.* (2010) comparent une méthode de résolution en deux phases avec une approche intégrée. El Hadj Khalaf *et al.* (2011) analysent l’impact de l’autorisation de la redondance et de la standardisation.

Une autre approche est proposée par Schulze et Li (2009a), qui considèrent dans une chaîne logistique globale à la fois les questions de commonalité et de différenciation retardée. L’objectif est de définir les modules, appelés “vanilla boxes”, qui seront produits et stockés dans chaque usine. Cependant, les bénéfices que peut engendrer l’utilisation des modules ne sont pas très clairs.

**Nomenclature détaillée.** La détermination des nomenclatures utilisées en production peut se faire en explicitant les nomenclatures possibles. ElMaraghy et Mahmoudi (2009) définissent pour chaque produit plusieurs nomenclatures alternatives, une seule étant retenue dans la solution optimale. Cette approche nécessite une énumération complète

de toutes les configurations de produits, mais facilite la formulation ainsi que la résolution. Le modèle proposé optimise simultanément le choix des nomenclatures et la chaîne logistique globale sur plusieurs périodes.

Le modèle le plus complet a été proposé par Chen *et al.* (2007) et Chen (2010), qui prend en compte des nomenclatures détaillées, des possibilités de substitution et une chaîne logistique intégrée. Ces modèles considèrent deux acteurs indépendants, les fournisseurs d'un côté dans le rôle du suiveur, et le producteur de l'autre dans le rôle du meneur. Cela conduit à un modèle de programmation linéaire mixte bi-niveaux. Un algorithme génétique est proposé ainsi qu'une méthode exacte.

**Autres.** Un intérêt particulier a été porté au choix des fournisseurs et des matières premières. Gupta et Krishnan (1999) ont présenté une formulation en programmation linéaire mixte pour intégrer les choix de standardisation des composants avec la sélection des fournisseurs. Des coûts fixes et variables sont considérés pour chaque composant. L'objectif est de déterminer le niveau de standardisation qui minimise les coûts, c'est-à-dire le meilleur équilibre entre économies d'échelle et coûts variables bas. Luo *et al.* (2011) s'intéressent à la détermination des familles de produits en prenant en compte les contraintes des fournisseurs et déterminant la chaîne logistique amont.

Dans la foresterie, il est nécessaire d'adapter les processus de fabrication car la qualité des matières premières varient Vila *et al.* (2005). Enfin, une étude du choix des familles de produits dans la bioraflnerie forestière a été menée par Mansoornejad *et al.* (2010).

## 2.2 Prise en compte de contraintes environnementales

La performance environnementale devient de plus en plus un aspect à prendre en compte. Les activités de production et de distribution ont en effet un impact environnemental important et les décisions prises quant à la conception d'un réseau logistique peuvent influencer considérablement sur cet impact. Par exemple, on peut choisir de placer des sites de production près des clients afin de minimiser le transport des produits. Ceci a bien sûr un impact *a priori* négatif sur les coûts. Les activités ayant un impact environnemental dans la chaîne logistique sont principalement le transport entre tous les nœuds du réseau, les activités de production, l'utilisation du produit et enfin la fin de vie du produit. La plupart de ces composantes sont des évaluations à intégrer au modèle, tandis que la gestion de la fin de vie du produit nécessite d'intégrer de nouveaux acteurs dans le réseau logistique : les points de collecte, les ateliers de test et de tri, les centres de recyclage... Ces aspects sont pris en compte par la logistique inverse. Sans les quantifier, Brezet et Hemel (1997) présentent ces composantes importantes du cycle de vie des produits : les matières premières et l'énergie nécessaire à

leur extraction, l'approvisionnement et la production des composants, la production des produits finis, la distribution, l'utilisation et la fin de vie. Tukker et Jansen (2006) mènent une étude quantitative de ces composantes à différents niveaux (groupe de pays, pays, ville) et différents secteurs d'activité.

Deux approches sont utilisées en optimisation. La première est de considérer l'impact environnemental du réseau logistique comme un nouvel objectif à minimiser. Frota Neto *et al.* (2008) proposent une méthodologie de prise en compte de l'impact environnemental d'une chaîne logistique en considérant tous les aspects détaillés ci-avant. L'évaluation de l'impact environnemental utilise les techniques de Data Envelopment Analysis pour définir un indicateur. Cet indicateur de l'impact environnemental est l'un des objectifs à minimiser. L'autre objectif est, comme vu auparavant, le coût de la solution. Ces deux objectifs sont gérés en utilisant l'optimisation multi-objectifs, basée sur la recherche d'un ensemble de solutions Pareto-optimales. Une solution est Pareto-optimale s'il n'est pas possible d'améliorer un critère à optimiser sans en détériorer un autre. Il est alors possible d'établir pour un problème donné une frontière de Pareto, c'est-à-dire l'ensemble de ces solutions Pareto-optimales. Cette frontière permet d'évaluer les compromis à faire pour, à partir d'une situation donnée, diminuer l'impact environnemental du réseau logistique. La seconde approche implique le concept de gagnant de commande. Les efforts sur les aspects environnementaux sont bien perçus par les consommateurs. Cela peut donc avoir un effet direct sur les revenus. Beamon (1999a) décrit les enjeux et les éléments importants de la prise en compte des facteurs environnementaux ; Beamon (2005) présente le problème d'un point de vue éthique ; Chaabane *et al.* (2009) proposent un modèle mathématique de conception de chaîne logistique en considérant les coûts directs des facteurs environnementaux ; Wang *et al.* (2011) utilisent une optimisation à deux objectifs : le coût et l'environnement, en donnant le choix des niveaux de protection de l'environnement sur chaque site de production.

### 2.3 Internationalisation des marchés

Les stratégies de délocalisation ont été largement étudiées. Ferdows (1997) présente une étude stratégique sur les avantages des sites de production délocalisés. Une étude quantitative sur l'approvisionnement offshore a été menée par Lowson (2001). Pour Camuffo *et al.* (2006), l'internationalisation est pour une firme un processus incrémental dans lequel l'entreprise s'engage graduellement et lui permet d'avoir une exposition à l'international.

Parmi les problématiques entourant l'industrialisation d'un produit, le recours à la sous-traitance a été fortement analysé, par exemple par Bouchriha (2002), sous la problématique

“Faire ou faire-faire ?”<sup>5</sup>

Un état de l’art sur les modèles d’optimisation de la chaîne logistique dans le contexte de la délocalisation a été présenté par Hammami *et al.* (2008), qui proposent également un modèle d’optimisation et un cas d’étude dans le secteur automobile Hammami *et al.* (2009). Ils préconisent une modélisation basée sur les activités afin de prendre en compte les spécificités de la délocalisation (gestion des capacités de production, transfert des prix, coûts de délocalisation, taxation et taux de change...).

---

<sup>5</sup>Plus étudié sous l’appellation “Make or buy”.



## CHAPITRE 3

### PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

#### 3.1 Description de l'étude

##### 3.1.1 Justifications et hypothèses de travail

La revue de la littérature a montré l'intérêt grandissant porté aux méthodes d'optimisation liant la conception produit et la conception de la chaîne logistique et l'intégration des contraintes environnementales. La plupart des travaux cités ont été publiés dans les années 2000. Cependant, plusieurs manques peuvent être identifiés :

**Les nomenclatures détaillées sont peu traitées** pour les familles de produits. La plupart des travaux s'intéressant explicitement aux familles de produits ne considèrent que les fonctionnalités et leur regroupement en modules. Les nomenclatures induites sont alors limitées à un seul niveau ;

**Les expérimentations ne sont pas assez approfondies** lorsque les nomenclatures détaillées sont traitées. Les nomenclatures testées sont en général simples, peu profondes avec un nombre d'assemblages limités et une diversité restreinte. Par exemple, Thanh *et al.* (2008) génèrent leurs nomenclatures en se limitant à trois niveaux d'assemblage (produits, sous-assemblages et composants). En considérant les substitutions, il paraît crucial de pouvoir tester un nombre important d'instances. De plus les analyses des modèles méritent plus d'attention ;

**Les modèles d'optimisation produits – chaîne logistique sont encore rares.** De part la complexité des modèles induits, très peu de modèles traitent des problèmes intégrés. À notre connaissance, le modèle le plus complet est celui de Chen (2010). Celui-ci utilise un très grand nombre de variables pour modéliser le problème complet et est par conséquent difficile à résoudre.

Les travaux de cette thèse reposent sur les hypothèses suivantes:

1. Les assemblages d'une famille de produits sont dépendants les uns des autres dans leur allocation aux sites de production ;
2. Il existe des impacts mutuels entre les activités de conception d'une famille de produits et de la chaîne logistique d'une entreprise. Dès lors, il n'est pas optimal de concevoir

le produit puis sa chaîne logistique, les deux activités doivent être déterminées simultanément ;

3. Il est possible de formuler le problème de conception conjointe produits-chaîne logistique de façon linéaire.
4. Les impacts environnementaux proviennent à la fois des composants utilisés dans les produits, des modes de productions et de leur transport.

Nos travaux reprennent le modèle proposé par Paquet *et al.* (2004), qui prend en compte tous les aspects pertinents à l'optimisation de la chaîne logistique d'une industrie manufacturière tout en restant simple à mettre en œuvre. Celui-ci intègre les contraintes liées à la gestion des nomenclatures, mais ne considère pas la possibilité de modifier celles-ci afin de permettre des gains en production. Notre objectif est donc d'inclure dans ce modèle des possibilités de substitution de certaines parties du produits, de même que de prendre en compte les contraintes environnementales.

### 3.1.2 Objectifs généraux et spécifiques

L'objectif général de cette étude est de développer un outil d'aide à la décision permettant la conception optimale d'une famille de produits et de sa chaîne logistique.

Cet objectif peut être découpé en trois objectifs spécifiques :

- déterminer si la famille de produits et la chaîne logistique doivent être conçues simultanément ou non ;
- modéliser et analyser le problème de conception simultanée d'une famille de produits et de sa chaîne logistique à l'aide de la programmation linéaire en nombre entier ;
- développer des méthodes de résolution exactes et approchées pour le modèle proposé ;
- développer un outil d'aide à la décision ;
- intégrer la prise en compte des impacts environnementaux.

## 3.2 Méthodologie

### 3.2.1 Étude de la pertinence de concevoir simultanément une famille de produits et sa chaîne logistique

Avant de traiter le problème de conception conjointe, une première phase s'intéresse à étudier les mécanismes existants entre la conception des produits et de la chaîne logistique afin de justifier l'intérêt de ce problème.

Pour cela, l'étude porte sur un modèle de conception de chaîne logistique permettant la prise en compte des nomenclatures produits. À partir de ce modèle, plusieurs scénarios, représentant toutes les configurations produits possibles, sont analysés. Cette méthode permet de résoudre un problème d'optimisation conjointe lorsque la nomenclature du produits reste simple et que les possibilités de substitutions sont peu nombreuses. En effet, il s'agit de tester toutes les combinaisons de nomenclatures possibles.

Le modèle de Paquet *et al.* (2004) a servi de base à ces expérimentations, qui ont mis en évidence les interdépendances entre la configuration du produit et celle de la chaîne logistique. Ce travail est présenté dans le chapitre 4.

### 3.2.2 Présentation détaillée du modèle

Cette partie décrit les décisions qui seront considérées dans nos modèles. Ces décisions portent d'une part sur les choix de substitutions de composants, sous-assemblages et de produits au sein des familles de produits et d'autre part sur les choix liés à la chaîne logistique.

#### **Quels produits/sous-ensembles fabrique-t-on lorsque des substitutions sont possibles?**

Nous considérons la fabrication de biens manufacturiers. Ceux-ci proviennent de l'assemblage de plusieurs pièces ou composants décomposables en plusieurs étapes intermédiaires (sous-ensembles). Ces composants définissent les fonctionnalités du produit final, avec un certain niveau d'exigence. Nous considérons qu'il est possible de substituer certains composants par d'autres tout en respectant les besoins du consommateur.

Les contraintes d'assemblage et les substitutions autorisées entre les composants et entre les assemblages sont définies en conception détaillée. L'optimisation de la nomenclature peut alors se faire en phase d'industrialisation. Un exemple de nomenclature pour deux produits est donné en Figure 3.1a. La nomenclature spécifique définit le produit avec ses niveaux de fonctionnalité et de qualité attendus.

Trois sortes de substitution au sein de la nomenclature sont considérées :

**La standardisation** (Figure 3.1b) est la possibilité de remplacer un composant ou un sous-ensemble par un autre soit avec plus de fonctions ou comprenant des composants de meilleure qualité afin de diminuer le nombre de pièces. En termes de coûts des produits, la standardisation n'est pas avantageuse. Mais la standardisation peut réduire le nombre de pièces qui doivent être gérées. Cette réduction permet d'économiser des coûts fixes. En outre, la demande pour chaque ensemble augmente et permet des économies d'échelle pour le transport et une meilleure utilisation des capacités de production Fixson (2007). En outre, ces économies d'échelle peuvent faciliter la délocalisation ;

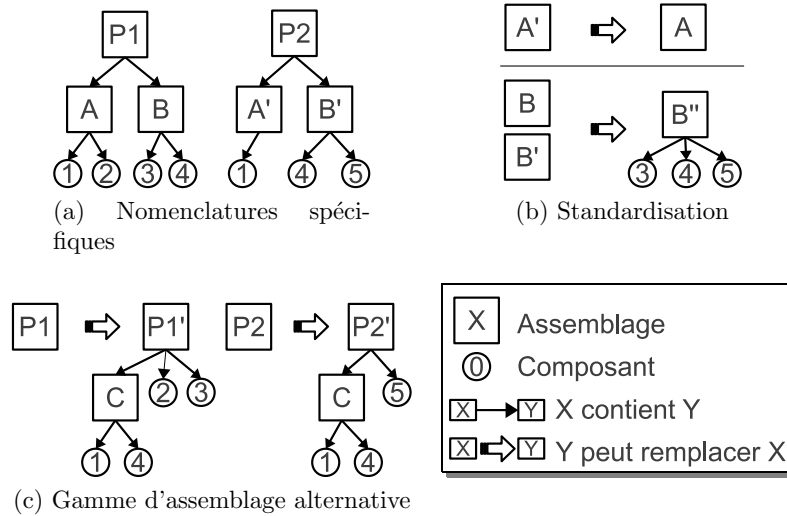


Figure 3.1 Illustration de nomenclatures et des possibilités de substitution.

**L'externalisation** : un sous-ensemble peut être acheté directement à un sous-traitant au lieu d'être fabriqué. L'externalisation permet de réduire les coûts fixes de production mais augmente les coûts variables. Dans l'exemple de la Figure 3.1a, les sous-ensembles  $A$  ou  $B$  pourrait être achetés;

**La gamme d'assemblage alternative** (Figure 3.1c) : différentes façons d'assembler les produits sont énumérées. Cela peut permettre une mise en commun des sous-ensembles permettant de réduire la diversité en production. Les coûts de production sont a priori les mêmes.

### Quel réseau logistique mettre en place pour produire et distribuer les produits?

La chaîne logistique considérée se veut générique et transposable au plus grand nombre d'applications. Elle prend en compte quatre échelons, illustrés par la Figure 3.2 :

**Les fournisseurs** potentiels sont caractérisés par l'ensemble des composants qu'ils peuvent fournir avec leur prix, leur quantité d'approvisionnement maximum, leurs coûts de transports vers chaque site et un coût fixe de contrat par fournisseur et par produit fourni ;

**Les unités de production** ont un coût d'ouverture, des coûts de production fixes et variables propres pour chaque produit et des capacités limitées en espace et en temps de

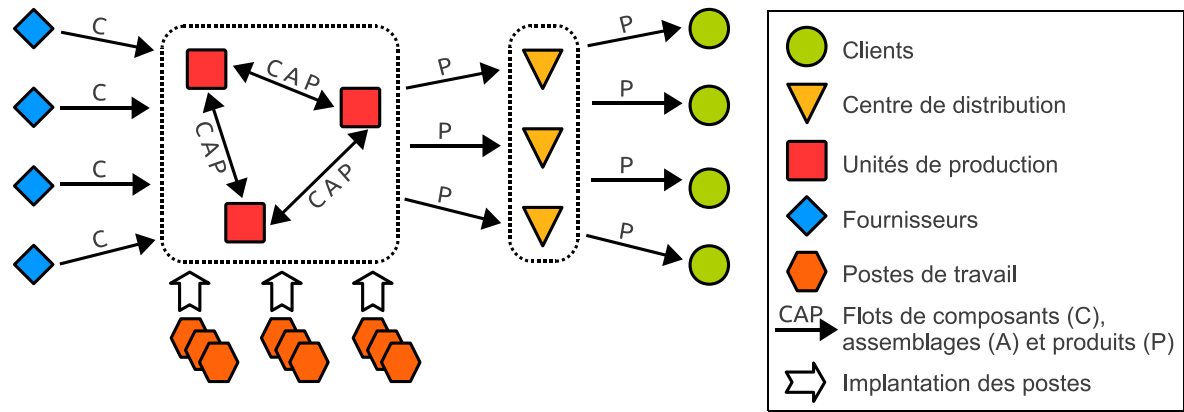


Figure 3.2 Représentation de la chaîne logistique.

main d'œuvre. Des postes de travail peuvent être implantés sur chaque site ; pour chaque type de poste, plusieurs alternatives sont possibles ;

**Les centres de distribution** ont un coût d'ouverture, des coûts de traitement fixes et variables des produits et des capacités limitées ;

**Les clients** ont une demande pour un ou plusieurs produits dont la quantité est connue et que l'entreprise est tenue de satisfaire.

Les décisions à prendre concernant la chaîne logistique sont :

1. Quels sites / centres de distribution ouvrir ?
2. Quels fournisseurs sélectionner ?
3. Quels postes de travail implanter dans chaque site ?
4. Quelle quantité de chaque assemblage produire sur chaque site ?
5. Quelle quantité de chaque composant acheter à chaque fournisseur ?

### 3.2.3 Formulation du problème de conception conjointe en programmation linéaire mixte et analyse du modèle

La deuxième phase de cette étude est de formuler le problème de conception conjointe, de développer des méthodes de résolution exacte et de conduire des analyses de ce modèle. Ceci est présenté dans le chapitre 5.

**Modélisation** La programmation linéaire mixte a été retenue pour la modélisation car son utilisation très répandue a montré de très bons résultats pour ce type de problème.

Le modèle de base reste celui de Paquet *et al.* (2004) car celui-ci couvre une grande partie de notre champs d’application concernant la chaîne logistique. Des modifications mineures sont apportées à ce modèle, telles que la prise en compte des centres de distribution et l’ajout de coûts fixes concernant la gestion des produits et des transports.

L’apport majeur au niveau de la modélisation réside dans l’intégration des possibilités de substitution. La difficulté est de garder un modèle linéaire, tout en limitant la complexité de la formulation. Le modèle utilisé par Chen (2010) démontre bien la complexité de cette formulation dans un cadre général : les variables de décision formulant les substitutions sont très nombreuses.

La section 5.2.2 présente notre formulation, qui intègre les substitutions dans les contraintes de flots mais en les découplant des variables modélisant la production – à l’inverse du modèle de Chen qui lie ces variables. Les premiers résultats montrent que cette formulation ne complexifie pas la résolution lorsque l’algorithme de *branch-and-bound* de *Cplex* est utilisé.

**Méthodes de résolution exactes** Les puissances de calcul actuelles couplées à des solveurs performants (les librairies Java de Cplex 12 d’Ilog-IBM sont utilisées) permettent de résoudre des instances de tailles raisonnables – de l’ordre de 30 fournisseurs, 10 sites, 10 postes de travail, 20 produits avec une centaine d’assemblages et de composants. Cependant, la résolution est fortement influencée par la configuration des instances, notamment le rapport entre les coûts fixes et variables. Des méthodes de résolution exacte doivent être développées pour rendre la résolution plus robuste et permettre de traiter de plus grosses instances.

L’étude de la littérature fait apparaître les bénéfices de la décomposition de Benders ainsi que l’ajout d’inégalités valides. Ce sont nos pistes de travail.

**Expérimentation** Le modèle proposé peut être étudié d’un point de vue expérimental, en testant des instances représentatives de plusieurs types de situations réelles. En particulier, il sera intéressant d’analyser dans quelles conditions les possibilités de substitution apportent des bénéfices. L’équilibre entre les surcoûts de substitution et les coûts d’implantation joue a priori un rôle important. Le degré de commonalité d’une famille de produit et les conditions du marché doivent également influencer les décisions. Enfin, un intérêt particulier sera porté aux stratégies mises en place pour rendre la chaîne logistique plus robuste comme le multi-sourcing, ainsi qu’aux contraintes sociales comme

garantir un niveau d'activité sur un site.

Nos données industrielles ne permettent pas de construire des cas d'études d'assez grandes envergures. Ces expérimentations porteront donc sur des instances académiques. Pour cela, un générateur d'instances a été développé, notamment pour construire des nomenclatures d'une famille de produits en contrôlant son niveau de commonalité.

### 3.2.4 Développement d'un outil d'aide à la décision

Le développement d'un outil d'aide à la décision nécessite de penser à l'utilisation sur le terrain des données et des résultats. Les besoins sont alors différents de ce qu'apporte le modèle d'optimisation décrit ci-avant. Les trois aspects suivants sont indispensables pour un outil d'aide à la décision :

**Déterminer les paramètres pertinents** Les paramètres d'entrée du modèle d'optimisation ne sont pas disponibles en l'état sur le terrain. Un traitement des données réelles est donc indispensable. Pour cela, il faut déterminer les données à recueillir sur le terrain et comment les agréger et les modifier en gardant tout le sens du problème. Les paramètres les plus difficiles à évaluer sont les coûts de gestion des produits. Un autre questionnement est le niveau de détail à donner au modèle. Faut-il retranscrire fidèlement la réalité ou décider du niveau d'agrégation le plus pertinent ?

**Donner des solutions rapidement** Avec des données parfaites, il est envisageable de disposer d'un temps de calcul raisonnable avant de donner une solution. Malheureusement, de telles données n'existent pas et les décideurs ont besoin de réagir face aux résultats. Les données peuvent être ajustées plusieurs fois pour vérifier l'impact que peut avoir une variation non prévue, ou forcer une partie de la solution pour obtenir des résultats plus cohérent. Pour permettre de telles interactions avec l'outil, le temps de résolution doit être court – de l'ordre de la seconde si l'on souhaite des interactions graphiques ou au pire de la minute.

Des heuristiques et des méta-heuristiques doivent donc être développées pour obtenir de bonnes solutions en un temps très court.

**Représenter des résultats permettant de prendre une décision** Le coût ne peut pas être le seul critère de choix. Une solution parfaite au niveau mathématique contient toutes les simplifications de modélisation qui ont permis de retranscrire la réalité. Ainsi, seul le jugement du décideur est valide, car celui-ci peut analyser la pertinence de la solution. Pour cela, il faut représenter les solutions de manière à ce qu'elles puissent être analysables facilement. Les outils à notre disposition sont les résultats chiffrés, à mettre

en perspectives par des ratios et des graphiques, des représentations géographiques des sites et des flux... Les indicateurs pertinents doivent être déterminés.

L'outil développé est présenté en annexe A. Il n'intègre pas les aspects environnementaux.

### 3.3 Contributions

Nous nous sommes intéressés aux liens entre l'optimisation des familles de produits et de la chaîne logistique. Tout d'abord, pour analyser les mécanismes des deux processus et leurs interdépendances, la standardisation dans le contexte de la délocalisation a été étudiée Baud-Lavigne *et al.* (2010). Une étude plus générale a été publiée Baud-Lavigne *et al.* (2012b), voir Chapitre 4, qui justifie l'utilisation de méthodes d'optimisation conjointe. Dans cet article, nous nous intéressons plus précisément aux liens entre la standardisation des produits ou des composants, et la conception de la chaîne logistique. Tout d'abord, nous montrons sur un petit exemple qu'il peut exister un grand intérêt à considérer simultanément ces deux décisions, et que la résolution de ces problèmes séparément pourrait aboutir à une décision sous-optimale. Puis, sur un problème simplifié provenant d'une étude de cas industrielle, nous décrivons l'impact des choix de standardisation sur la structure de la chaîne logistique et le gain qui peut être obtenu par une résolution conjointe des problèmes. Pour illustrer les solutions du problème, nous proposons des graphiques afin de visualiser, en fonction des quantités et / ou des coûts de transport, la meilleure décision pour la standardisation des produits et de la conception de la chaîne logistique. Ces graphiques permettent également d'anticiper les impacts d'une variation soit de quantité ou des coûts de transport, d'une situation spécifique. De tels graphiques peuvent être utilisés dans un outil d'aide à la décision pour guider les entreprises dans leurs choix. Enfin, nous montrons que les coûts et la structure de la chaîne logistique sont très touchées par ces décisions.

Un modèle de conception conjointe de produits et de la chaîne logistique a été présenté Baud-Lavigne *et al.* (2011b), avec pour avantages que l'ajout des substitutions n'impacte pas fortement les temps de résolution. Les problématiques multi-sourcing et de niveau d'activité minimale sur le même modèle ont été étudiées Baud-Lavigne *et al.* (2011a). Enfin, une étude des temps et des méthodes de résolution, ainsi qu'un générateur d'instance complexe a été proposé Baud-Lavigne *et al.* (2012c), voir Chapitre 5. Nous présentons dans cet article un modèle général qui prend en compte simultanément la construction de la nomenclature et de la conception du réseau logistique. Pour la nomenclature, des possibilités de substitution des produits, sous-ensembles et composants sont prises en compte. Pour le réseau logistique, les sites de production et la localisation des centres de distribution sont considérés ainsi que le choix des fournisseurs. Un programme linéaire en variables mixtes (PLNE) est proposé.



La formulation PLNE est résolue de manière optimale pour les instances de taille moyenne. Pour les instances de taille plus grande, deux heuristiques dérivées du PLNE sont conçues. Ces méthodes sont testées sur des instances de natures et de tailles différentes à partir d'un générateur conçu à cet effet.

Une revue de la littérature sur les liens entre la conception de familles de produits et des réseaux logistiques a fait l'objet d'une conférence Baud-Lavigne *et al.* (2011c).

La dernière contribution concerne l'intégration de contraintes environnementales Baud-Lavigne *et al.* (2012a), voir Chapitre 6. Il s'agit d'une extension des travaux présentés dans le Chapitre 5. Les préoccupations environnementales commencent à être prises en compte par les industriels, du fait des contraintes légales et des préférences des consommateurs. Nous proposons d'intégrer ces contraintes dans la conception des familles de produits et de leur chaîne logistique. Un modèle mathématique est proposé pour optimiser les coûts en limitant les émissions carbone, un autre permettant d'optimiser les émissions carbone sous contrainte de coût limite. L'impact de ces contraintes est analysé en les resserrant plus ou moins. Globalement, des résultats de qualité acceptable peuvent être obtenus lorsque les contraintes ne sont pas trop resserrées.

**PARTIE II**

**CONTRIBUTIONS**

## CHAPITRE 4

### MUTUAL IMPACTS OF PRODUCT STANDARDIZATION AND SUPPLY CHAIN DESIGN

**Abstract**<sup>1</sup> : This paper deals with two major issues for industries: the product design and the supply chain design. These problems are usually solved separately, but in recent years, approaches were proposed to tackle these two problems together. In this paper, we investigate more precisely the links between the standardization of products or components, and the design of the supply chain. First, we show on a little example that there is a great interest to consider simultaneously these two decisions, and that solving these interdependent problems separately could result in a suboptimal, or even a bad decision. Then, on a simplified problem issued from an industrial case study, we outline the impact of standardization choices on the structure of the supply chain and the gain that can be obtained from solving the problem as a unique compound optimization model. To illustrate the solutions of the problem, we propose graphics in order to visualize, in function of quantities and/or transportation costs, the best decision for the product standardization and for the supply chain design. Graphics also permit to anticipate the impacts of a variation of either quantities or transportation costs, from a specific situation. Such graphics they could be used in a decision aid tool to help companies in their choices. Finally, we show that costs and supply chain structure are highly impacted.

**Keywords:** Supply chain design, Product standardization, Relocation cost, Mixed Integer Linear Programming

#### 4.1 Introduction

In a highly competitive business environment, companies must diversify their offers to meet customer's demands. Managing diversity is a central issue: how to offer a wide variety of products that meet customer's needs, while controlling production, inventory and logistical costs? The answers usually involve many separate disciplines, mainly product design, production and logistics. Interdisciplinary, however, appears as a key in managing diversity (Riopel *et al.* (1998)).

Integrating product and supply chain optimization is facing two important barriers. The

---

<sup>1</sup> Baud-Lavigne, B., Agard, B. et Penz, B., 2012. Mutual impacts of product standardization and supply chain design. *International Journal of Production Economics*, 135(1) : 50-60.

first issue is to prove that the simultaneous design of the product and the supply chain is relevant. In fact, cost from the product itself should be much higher than logistical and production costs. Appelqvist *et al.* (2004) explain this in a recent survey:

“ Why is there then a lack of research into modelling of supply chains in the product design phase? Perhaps, in the final analysis, it is not important. Material costs typically stand for the majority of the product costs, and are determined in the product design phase. If these, in turn, are determined by the desired product functionality, there is little that supply chain modelling can achieve. ”

However, this limitation is slowly taking down with the increase of transportation costs mainly due to oil price and carbon taxes. Also, simultaneous optimization of criteria is relevant if and only if there exist linked impacts between these criteria. Otherwise, sequential optimization can be used. It is well established that product design has a great impact on manufacturing and logistics (Dowlatshahi (1996)). However, the opposite link has to be highlighted. This paper focuses on this first issue.

The second issue concerns the solution of such a combined problem. The integrated supply chain design is already a complex problem. Adding new decisions, such as product standardization, increases the difficulty to model the problem and to solve it efficiently.

When considering mass customization, it may be sub-optimal to first design the product, and then the supply chain. A review of the current literature shows that attention is mainly given on separated approaches, while very few studies consider joint design. Nevertheless, joint design of product standardization and supply chain offers new perspectives. Standardization is the possibility of replacing a component or a sub-assembly by another one with either more function or including components with higher quality in order to decrease the number of parts. In terms of product costs, the standardization is not advantageous. However standardization can reduce the number of parts that have to be managed. This reduction permits to save fixed costs. Furthermore, the demand for each part increases economies of scale for transportation and permits a better use of production capacity (Fixson (2007)). This can provide economies of scale to allow cheaper relocation. To highlight this, a little case study is proposed to show the optimality of the joint design on sequential design under some restrictive hypotheses. Then, the analysis of more realistic cases shows various impacts of the standardization on the supply chain design. To illustrate the solutions of the problem, we propose graphics in order to visualize, in function of quantities and/or transportation costs, the best decision for the product standardization and for the supply chain design. Graphics

also permit to anticipate the impacts of a variation of either quantities or transportation costs, from a specific situation. Such graphics could be used in a decision aid tool to help companies in their choices. Finally, we show that costs and supply chain structure are highly impacted.

The paper is organized as follows. In Section 4.2, a literature review is given. Section 4.3, presents the problem of supply chain design considering product standardization. A small example shows that, in certain circumstances, product standardization and product allocation must be taken into account simultaneously. To better understand the links between product standardization and the supply chain, numerical experiments are led using MILP exact solution (Section 4.4). These results show that the impacts are important for both costs and structure of the solutions. Section 4.5 concludes the paper and proposes ways to investigate this difficult problem.

## 4.2 Literature review on product and supply chain design

In product design, high diversity at low cost can be obtained through mass customization, concept well defined by Pine (1993). Mass customization seeks to offer a wide variety of finished product with the advantages of mass production, *i.e.* low production, storage and logistic costs. Mass customization involves a set of concepts that can be used at the product design stage: modular design, scalability and commonality. Modular design (Kusiak et Huang (1996)) consists to assemble the product from functional modules. Scalability allows easy changes to the product, while, commonality (Fixson (2007)) reuses components or sub-assemblies of other existing products. During the industrialization phase, delayed differentiation (Su *et al.* (2005)) has permitted to personalize products in the manufacturing process (Fournier et Agard (2007)). These developments offered new opportunities for optimization. Authors then worked on either optimization of product families to meet customer needs precisely and at lowest cost (Briant et Naddef (2004) Barajas et Agard (2009)) or module optimization (da Cunha *et al.* (2007) Agard et Penz (2009)).

Once the product is designed, the goal is then to reduce logistic costs by the design of a supply chain, taking into account both strategical and tactical decisions. The strategic level includes decisions impacting the long term of the company. For example the choice of production facilities, their load / manufacturing capacities and technologies used may be viewed as strategic. The tactical level includes mid-term decisions, such as the choice of suppliers, the allocation of products to production facilities, and the flow of each product and sub-assembly

in the network (Cordeau *et al.* (2006)). The parameters considered in the supply chain design problem are related to the manufacturing (cost structure, workforce, capacity etc.) and to the logistics induced by a dispersion of production sites. Many studies have focused on the supply chain design problem, an overview is proposed by Shapiro (2001) who provided models for a wide variety of issues related to supply chain. See also Melo *et al.* (2009) for the most recent review for deterministic models and Peidro *et al.* (2009) for the stochastic models. A comprehensive study on the logistical decisions is also proposed by Riopel *et al.* (2005) who presented a framework which highlights all the links between the product and supply chain design.

Joint product and supply chain design opens new perspectives in the issue of high diversity of products. Most approaches developed to solve this combined problem are crossed approaches. The first type of approach consists to incorporate product constraints in the supply chain design, by taking into account, for example, the assembly constraints. Integrated supply chain models considering bill-of-materials are recent and still little studied. Several single-period, multi-product and multi-level models have been proposed by Paquet *et al.* (2004), Paquet *et al.* (2008), and Cordeau *et al.* (2006) and a multi-period model was presented by Thanh *et al.* (2008). Some studies analyzed the impact of the product design on the supply chain. For example, Salvador *et al.* (2004) investigated the consequences of the level of mass-customization on the supply chain by an empirical research and showed that the degree of customization has a significant impact on the supply chain configuration. Montreuil et Poulin (2005) proposed a supply chain design suited to personalized manufacturing.

The second type of crossed approach is to integrate logistic constraints in the product design. Benefits of “ Design for Logistics ” (DFL) have been highlighted by Dowlatshahi (1996). These approaches promote the use of concepts such as modular design, delayed differentiation and other qualitative rules. Such as reducing the number of components or references used, and integrating of upstream suppliers of design projects to allow lower costs associated with storage and transportation products.

Integrated approaches, which involve complex models, are poorly investigated yet. The simultaneous optimization of product and supply chain design is a difficult problem. Authors have looked at partial models, simpler to solve and to implement. Gupta et Krishnan (1999) presented a mixed integer programming formulation to integrate component standardization and supplier selection decisions. Fixed and variable costs are associated to each different component. The optimal solution is found with the proper level of standardization, which

allows fixed cost economies, while increasing variable costs. In order to develop more comprehensive models, the product design is limited to a choice among pre-defined bill-of-materials (BOM), which are more-or-less fixed earlier in the design phase. Two approaches are listed in the literature. The first approach seeks to define the best product family which meets the market needs, by using generic BOM to model the product part of the problem (Lamothe *et al.* (2006) Zhang *et al.* (2008)). In these formulations, BOM are determined so as to respect assembly constraints. The second approach considers the final products as fixed, but the BOM are more or less flexible. To model this in an assembly-to-order context, El Hadj Khalaf *et al.* (2010) considered function and modular design, in which all the assemblies are possible. The background of their study is the automobile industry, in a mass-customization context. El Hadj Khalaf *et al.* (2010) proposed a model to choose simultaneously the modules to produce and their suppliers, with a constraint on the final assembly time. ElMaraghy et Mahmoudi (2009) defined several alternative BOM, one being selected in the optimal solution. This approach needs a complete enumeration of all product configurations. In return, both formulation and solution are facilitated.

Our study differs from the literature by addressing the specific problem of the product standardization. The aim of the paper is to analyze the impact and benefits of product or component standardization on optimizing the supply chain.

### 4.3 Supply chain design and standardization possibilities

#### 4.3.1 Problem description

In this study, the integrated supply chain design is to define both the supply chain structure and the product bill-of-materials. The supply chain is limited to production units, which can exchange sub-assemblies with each others. The distribution is not considered in the model, and demands are allocated to a determined production unit. Each unit is described by its labour cost and the transportation costs to other units. Products are represented through their bill-of-materials, *i.e.* their sub-assemblies. By definition, all assemblies can be produced and transported from a unit to another.

When considering products build up with only one assembly, this problem reduces to a classical facility location problem. However, constraints between assemblies through the bill-of-materials change the issue, and the problem becomes more difficult to solve. In the literature, some authors used the term "facility location" to define this kind of problem, as Thanh *et al.* (2008). However, the model presented in the paper does not include implantation

unit costs. Only product allocation is considered.

In the small example presented in Figure 4.1, two products are considered:  $P$  and  $P'$ . Each product is composed of two sub-assemblies.  $P$  is composed of sub-assemblies  $A$  and  $B$ , while  $P'$  contains  $A'$  and  $B'$ . Sub-assembly  $B$  is composed of two components  $D$  and  $E$ , and  $B'$  contains only  $E$ .

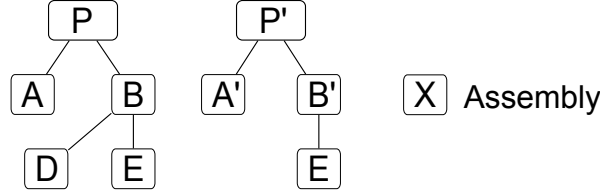


Figure 4.1 Bill-of-materials for the products  $P$  and  $P'$

Each sub-assembly is described by its processing time (which determines the production costs) and by its physical volume (which determines the transportation costs).

Standardization possibilities can be expressed through explicit equivalences between assemblies. In Figure 4.1,  $B'$  contains  $E$ . Also,  $B$  contains  $D$  and  $E$ . We observe that  $B' \subset B$ . We assume then that  $B$  has more functionalities than  $B'$  and that  $B'$  can possibly be replaced by  $B$ . Then  $B$  can be used to standardize  $B'$ .

The aim of the optimization is to decide what sub-assemblies have to be standardized, and where the different assemblies have to be produced. Figure 4.2 shows an example of the result that is expected. In this solution,  $B$  replaced  $B'$ . Also  $P$ ,  $P'$ ,  $A$  and  $A'$  are affected to site 1,  $B$  and  $D$  to site 2, and  $E$  to site 3.

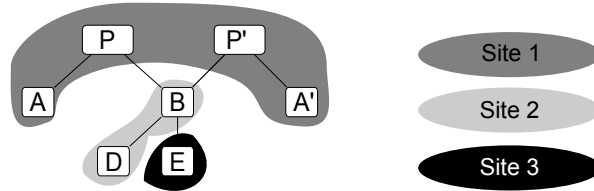


Figure 4.2 Solution pattern of the problem



### 4.3.2 Mathematical formulation to design the supply chain

The model presented in this section product allocates products to facilities, while satisfying production and logistic constraints. An integrated supply chain design can be easily obtained by adding component and supplier constraints. Standardization possibilities are not included in the model. The goal of the paper is to analyze the impacts of the standardization on the supply chain on various examples. The integration of standardization leads to a more complicated model, discussed later in the perspectives. Experiments presented in Section 4.4 are made by solving the model presented in this section for all standardization alternatives.

The initial model is a simplified version of the model developed by Paquet *et al.* (2004). The simplified model allows to concentrate the analysis on the impact of the standardization. The problem is formulated with the following notations:

Sets:

- $P$  : products ; index :  $p, q \in P$ ,
- $U$  : production center ; index :  $i, j \in U$ .

Parameters:

- $G_{ij}$  : bill-of-materials.  $G_{ij} = 1$  if  $P_i$  is composed of  $P_j$ .  $P_i$  is a finished product if column  $i$  is zero, a raw material if raw  $i$  is zero, else a manufactured product,
- $D_{pi}$  : demand for product  $p$  on center  $i$ ,
- $t_p$  : processing time for product  $p$ ,
- $v_p$  : volume of product  $p$ .

Costs:

- $C_i$  : mean hourly cost of manpower in production center  $i$ ,
- $C_{f_{pi}}$  : fixed cost if center  $i$  produces product  $p$ ,
- $C_{t_{ij}}$  : transportation cost by unit of volume of a product between centers  $i$  and  $j$ .

Decision variables:

- $X_{pi}$  : quantity of product  $p$  manufactured in center  $i$ ,
- $Y_{pi}$  : 1 if center  $i$  produces product  $p$ , else 0,

- $F_{pij}$  : flow of product  $p$  from center  $i$  to center  $j$ .

Then, the supply chain design problem can be formulated as a Mixed Integer Linear Program as follows:

$$Z = \min \sum_{i \in U} \sum_{p \in P} (X_{pi} C_i t_p + Y_{pi} C f_{pi}) + \sum_{i \in U} \sum_{j \in U \setminus i} \sum_{p \in P} F_{pij} C t_{ij} v_p \quad (4.1)$$

s.t.

$$X_{pi} + \sum_{j \in U \setminus i} F_{pji} = \sum_{j \in U \setminus i} F_{pij} + \sum_{q \in P \setminus p} G_{qp} X_{qi} + D_{pi} \quad \forall i \in U, \forall p \in P \quad (4.2)$$

$$X_{pi} \leq Y_{pi} D_p \quad \forall i \in U, \forall p \in P \quad (4.3)$$

$$X_{pi} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in U, \forall p \in P \quad (4.4)$$

$$Y_{pi} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in U, \forall p \in P \quad (4.5)$$

$$F_{pij} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i, j \in U, \forall p \in P \quad (4.6)$$

The objective function (1) minimizes production and transportation costs. Constraints (4.2) are the flow constraints, described in Figure 4.3. For each product  $p$  on a center  $i$ , entering flows represent products transported from every other centers to  $i$ , and production of  $p$  on  $i$  (the source), while outgoing flows represent products  $p$  transported from  $i$  to every other centers, products in the bills-of-materials of other assemblies produced in  $i$  and the demand (the sink). Constraints (4.3) assure that fixed costs are paid when a product is manufactured on a unit. When  $X_{pi} > 0$ ,  $Y_{pi} = 1$ . To verify this inequality,  $D_p$  must be a constant greater than  $X_{pi}$ . So,  $D_p$  is the total demand associated with assembly  $p$  in the whole supply chain. Constraints (4.4), (4.5) and (4.6) define decision variables as positive integers for  $X$  and  $F$ , and as boolean for  $Y$ .

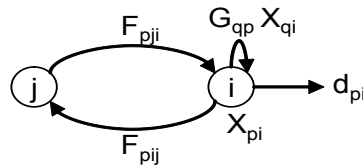


Figure 4.3 Flow of assembly  $p$  on site  $i$

### 4.3.3 Relevance of joint standardization and supply chain optimization

The following example is a small case built to show that standardization and supply chain design should be tackled simultaneously. In this small case, we look for a situation in which

the standardization and the allocation of production to different sites are not advantageous if they are considered independently, but advantageous if the two decisions are taken into account simultaneously. Then, we propose a simple Linear Program in order to find a case where the sequential approach gives bad results, and the integrated approach gives good results.

Let us consider the following situation. Two products  $p$  and  $q$ , and two production centers  $i$  and  $j$  are considered. Product  $q$  can be standardized, and then replaced by product  $p$ . The demand occurs only in site  $i$ .

The model considers the following parameters:

- Two production units  $i$  and  $j$ ,
- $Cf_i = Cf_{pi} = Cf_{qi}$  and  $Cf_j = Cf_{pj} = Cf_{qj}$  are the fixed production cost for products  $p$  and  $q$  where  $Cf_i \leq Cf_j$ ,
- $Cf_a = Cf_j - Cf_i$  is the additional production fixed cost for an assembly in production center  $j$  instead of production center  $i$ ,
- $t_p = t_q = t$ , the processing time is the same for the two products,
- $C_i$  and  $C_j$  are the hourly production costs in centers  $i$  and  $j$ , and  $C_i \geq C_j$ ,
- $CV = t(C_i - C_j)$  is the variable production saving when manufacturing a product in  $j$  instead of  $i$ ,
- $CS$  is standardization cost, *i.e.* additional cost per product when product  $q$  is replaced by product  $p$ ,
- $T$  is the unit transportation cost from center  $i$  to center  $j$  and conversely, assuming  $v_p = v_q$  and  $Ct_{ij} = Ct_{ji}$ ,
- $D = D_{pi} = D_{qi}$  are the demands of each final product.

Table 4.1 presents the four possible alternatives. The initial solution is to produce both products  $p$  and  $q$  in production center  $i$ . The initial solution cost (noted  $ISC$ ) can be calculated as  $ISC = 2Cf_i + 2tDC_i$ . Three other alternatives are possible. Alternative  $A$  consists in producing products  $p$  and  $q$  in production center  $j$  and transporting them from center  $j$  to center  $i$ . In alternative  $B$ , product  $q$  is replaced by product  $p$  and the production is made in site  $i$ . In alternative  $C$ , product  $q$  is replaced by  $p$  and the production is made in site  $j$ . Due to the parameters chosen in this example, it is easy to see that solutions where the

production is split on plants  $i$  and  $j$  are dominated. In Table 4.1, the impact on cost of these alternatives is compared to the initial solution.

Table 4.1 Differences in cost of the production alternatives

	Local production		Distant production	
Specific BOM	Initial solution (ISC)		Alt. A	$ISC$ $+2Cf_a$ $+2D.T$ $-2D.CV$
Standardized BOM	Alt. B	$ISC$ $+D.CS$ $-Cf_i$	Alt. C	$ISC$ $+D.CS$ $+2Cf_a$ $+2D.T$ $-Cf_i$ $-2D.CV$

For alternative  $A$ , as the production is relocated in site  $j$ , we have to pay two times the additional production fixed cost ( $Cf_a$ ) and the transportation cost for the two products ( $DT$ ), but we gain two times the variable production saving. In alternative  $B$ , we must pay the additional cost per product when product  $q$  is replaced by product  $p$ , but we gain a fixed production cost  $Cf_i$ . Finally, for alternative  $C$ , we pay the cost of the standardization ( $D.CS$ ), two times the additional production fixed cost ( $Cf_a$ ) and the transportation cost for the standardized products ( $2DT$ ), and we gain a fixed production cost  $Cf_i$  and the variable production saving ( $2D.CV$ ).

As we now show that the standardization (resp. the move of the production to site  $j$ ) is not profitable, and that taking both decisions simultaneously is interesting, the following model is written. The production does not provide any benefit when only standardizing (4.7) or only relocating (4.8), whereas both combined is profitable (4.9).

$$D.CS - Cf_i \geq 0 \quad (4.7)$$

$$2Cf_a + 2D.T - 2D.CV \geq 0 \quad (4.8)$$

$$D.CS + Cf_a + 2D.T - Cf_i - 2D.CV \leq 0 \quad (4.9)$$

Many configurations respect these constraints. Two of them are presented in Table 4.2.

Table 4.2 Results for two data sets

	$Cf_i$	$Cf_a$	$CV$	$CS$	$T$	$D$	Alt. A	Alt. B	Alt C
Data 1	20000	10000	4	2	3	10000	0	0	-10000
Data 2	30000	25000	5	4	3	10000	+ 10000	+10000	-5000

With the first set of parameters (Data 1), benefits are resulting neither from relocation only (alternative A) nor from standardization only (alternative B), but both alternative combined provide a benefit of 10000. Note that the initial value of the solution for alternatives A and B have the same total cost. For the second set of parameters (Data 2), both options (alternatives A and B) result in losses, while the combined alternative (alternative C) gives a benefit of 5000. In both cases, sequential design would lead to keep the initial solution, which is suboptimal. This result can be generalized on more realistic studies. Indeed, when increasing complexity of products, *i.e.* levels of sub-assembly, other effects are added which can increase this phenomena. However, this has to be tested on more realistic case studies. This is the goal of the following experiments which use MILP optimization.

## 4.4 Experiments with standardization and relocation

### 4.4.1 Design of experiments

Experiments are based on two academic case studies. The first case study represents identical manufacturing units, *i.e.* units with same labour costs, and demand. The problem is to decide the degree of specialization of each unit, between producing all assemblies to meet their own demand, and producing assemblies for both demands. The second case study illustrates the issue of relocation, with a unit with high labour costs which meets the whole demand, and another unit with lower costs but far away from the first one, incurring transportation costs. In this second case, the problem is to decide which parts of the product have to be

transferred to the distant unit.

In both cases, the products considered are illustrated in Figure 4.4 and their characteristics are given in Table 4.3. Sub-assembly  $A$  is large, so costly in transportation, while  $B$  is small, but using more processing time.

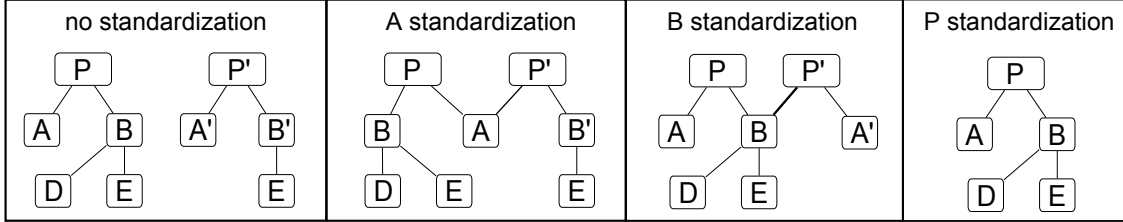


Figure 4.4 Standardization possibilities

Table 4.3 Product characteristics

	Sub-assemblies							
	$P$	$P'$	$A$	$A'$	$B$	$B'$	$D$	$E$
Volume (in $m^3$ )	0.6	0.5	0.5	0.3	0.05	0.05	0.005	0.02
Processing time (in h)	1.7	1.5	0.5	0.45	0.4	0.3	0.2	0.2

The standardization possibilities for product  $P'$  are to substitute module  $A'$  by  $A$ , or  $B'$  by  $B$ , or the whole product  $P'$  by  $P$ . Additional costs of standardization are induced mainly by volume increase for  $A$ , and processing time increase for  $B$ . When standardizing  $B$ ,  $D$  has to be produced for  $P'$ , which adds processing time. Consequently,  $A$  standardization is sensitive to transportation cost variation, while  $B'$  standardization is sensitive to labour cost, and  $P$  to both. Transportation costs are paid only when sub-assemblies are moved from a unit to another. For a local production,  $A$  standardization has nearly no negative effect, while  $B$  and  $P$  standardizations generate extra labour cost.

These case studies have been tested with the four standardization options, *i.e.* standardization of  $A$ ,  $B$ ,  $P$ , or no standardization at all. Variations of parameters are presented in Figure 4.4. For this case study, four models were solved. For a more general problem, this number depends on the number of all possible standardization options and on the compatibilities between them (this could be considered as different scenarios). In the worst case,

if we have to consider all standardization options between all components, an exponential number of problems will have to be solved. So, this approach is better adapted for small size problems or to evaluate a limited number of scenarios. Labour cost variations are relevant only in the second case study. Impacts on the first case study are negligible as the two units have the same labour cost. Fixed costs fluctuate depending on the initial fixed costs.

Table 4.4 Variation of parameters

	Beginning	End	Step
Demand	100	10000	100
Transportation costs	0	200	2
Labour cost	0	25	1
Fixed costs (in percentage of initial costs)	0.1	10	0.1

Experiments are led by solving the MILP presented in Section 5.2.2 with ILOG CPLEX 10.2. Java libraries on a laptop with a Intel Core2Duo CPU @ 2.26 GHz and 2GB RAM. Resolution is launched four times – one per standardization choice as seen in Figure 4.4 – for each parameter set. For example, Figure 4.12 required solving 39600 MILP problems.

To analyze the results, we give comprehensive figures that could be used by managers in the decision process. In the first type of figures (Figures 5–11), we show the evolution of the gain given by the standardization (left Y-axis). The reference value is the optimal solution without standardization but with an optimized supply chain. The gain is expressed as a percentage of the optimal solution. The second Y-axis (on the right side) shows the level of standardization in the optimal solution. These results are given in function of the evolution of a selected parameters (X-axis). The studied parameters are the fixed costs, the transportation cost and the demand for the case with same facilities; for the relocation case, the parameters are : the labour cost, the fixed costs, the transportation cost and the demand. Moreover, the standardized components are given at the top of the graphics. The letter  $X$  means that the components  $X'$  is standardized by  $X$  in the optimal solution. The second type of figures (Figures 12 and 13) is a three-dimensional graphic which shows the optimal standardization strategy when two parameters vary. This graphic first identifies, for each couple of data, the best solution in terms of standardization, and then draws zone showing the best strategy. The same principal is used to show the relocated sub-assembly percentage. The analyzes are made for demand and fixed costs, and for demand and transportation cost, for the case of differentiated facilities.

#### 4.4.2 Case study 1: Same facilities

This case study considers two manufacturing units with identical characteristics. Each unit faces the same demand for  $P$  and  $P'$ . Parameters are presented in Tables 4.5 and 4.6.

Table 4.5 Case study 1 - Demand characteristics

	$P$ demand	$P'$ demand
Each unit	1500	1500

Table 4.6 Case study 1 - Production unit characteristics

	Transportation cost	Fixed cost for $P, P', A, A', B$ and $B'$	Fixed cost for $D$ and $E$	Labour cost
Each unit	30 €/m <sup>3</sup>	10000 €	3000 €	25 €/h

The impact of the following parameters has been tested separately: demand, transportation cost, labour cost and fixed cost. For each data value, three results are given: (1) the modules that have to be standardized, (2) the structure of the supply chain: an indicator is used, which represents the percentage of sub-assembly made in only one unit. When this indicator is at 100%, each unit makes distinctive parts for the products and then shares the assemblies – when 0%, each unit produces the whole products and therefore the units are independent, *i.e.* no assembly is shipped. (3) the gain/loss of standardization against basic product. In all cases, optimized supply chain is considered. When there is no other information, parameters are fixed as presented in Tables 4.3 and 4.5.

#### Variation of the fixed cost

The variations of fixed cost is the same in the two production units, from 0.1 to 10 times initial values (Table 4.5). The results are presented in Figure 4.5.

First, when the fixed costs grow, more components or products are standardized. Obviously standardization permits to save fixed costs, and when these costs are large, the gain becomes interesting. Between 0.1 and 1, only  $A'$  is standardized by  $A$ . From 1 to 10,  $P'$  is standardized by  $P$ . The supply chain function increases with the fixed costs by step, either when there is a change in the product (at 0.1 or 1.3) or with fixed cost variations (at 2.5). The



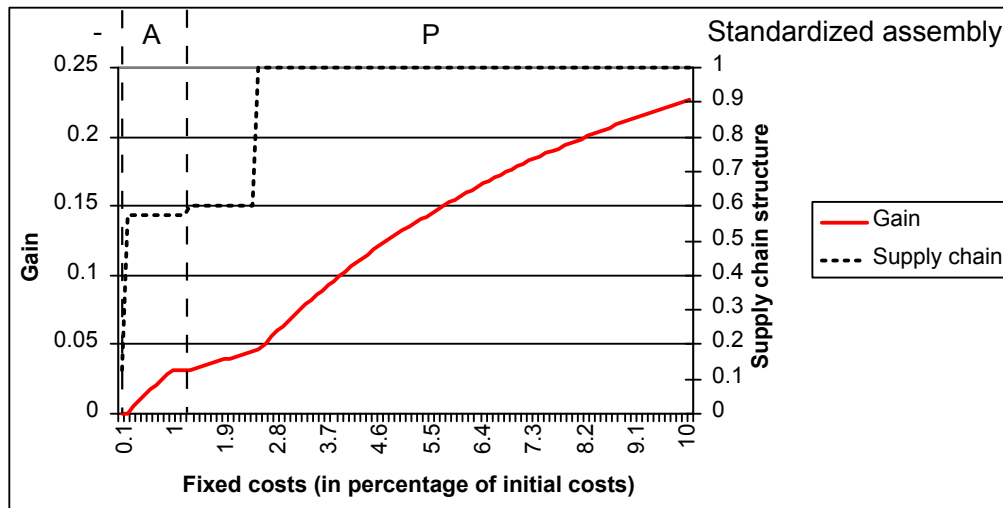


Figure 4.5 Gain of standardization and supply chain configuration - Fixed cost variation

gain function also increases with the fixed costs, and its slope depends on the standardization option, the supply chain structure and the fixed cost level.

### Variation of the transportation cost

The variations of transportation is now studied. Results are presented in Figure 4.6. The transportation cost varies from 0 to 200.

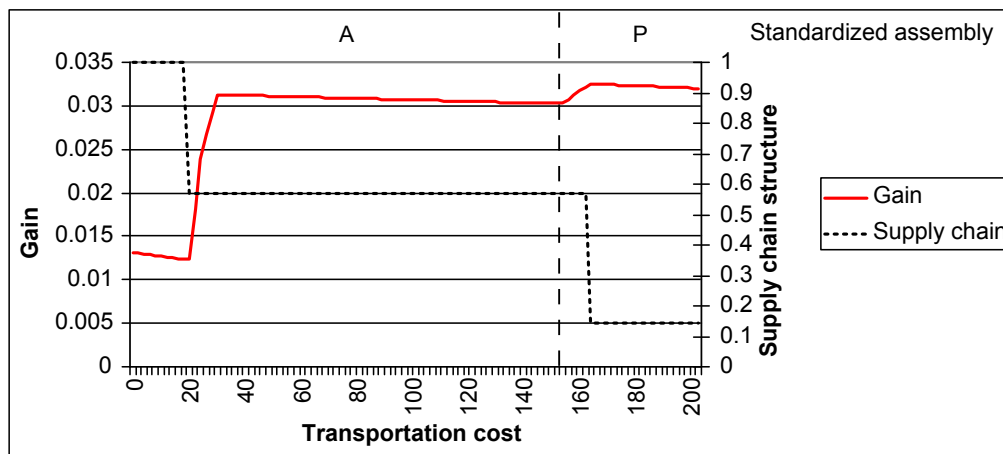


Figure 4.6 Gain of standardization and supply chain configuration - Transportation variation

Predictable behaviours are highlighted. Shipped quantities decrease in two steps with the increase of transportation costs. Below a transportation cost of 20, units are completely specialized and  $A'$  is standardized. Then, the product is the same but the supply chain design changes: 40% of sub-assemblies are made in the two units. The gain increases rapidly from 1.25% to more than 3%. At 150,  $P'$  is standardized without any changes on the supply chain design, but the gain increases of 0.25%. At 160, units become nearly independent, *i.e.* only 17% of modules are shared between the units.

### Variation of the demand

The variations of demand is now studied. The demand is the same for each product at each unit. Results are presented in Figure 4.7.

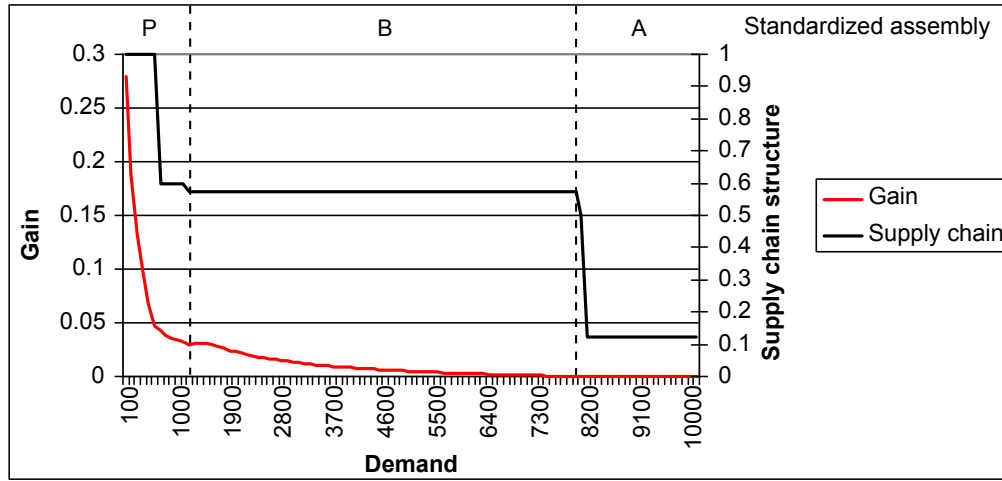


Figure 4.7 Gain of standardization and supply chain configuration - Demand variation

As demand grows, sub-assemblies are less and less shared between the units. When the demand is less than 800, the best solution is to standardize  $P'$ . When demand varies between 800 and 8000,  $B'$  is replaced by  $B$ . Afterwards, until the demand equals 10000, only  $A'$  is standardized. Also, when the demand varies from 100 to 10000, the gain falls dramatically from 30% to 0%. When demand equals 500, the gain is of 5%, and drops down to 3% when demand attains 1000.

#### 4.4.3 Case study 2: Differentiated facilities

This case study represents the issue of relocation. The local unit faces the whole demand, with higher production costs than the distant unit. The fixed costs are higher in the distant unit because of the investments required for the setting of the production system. Characteristics are presented in Table 4.7.

Table 4.7 Case study 2 - Production units characteristics

	$P$ demand	$P'$ demand	Labour cost
Local unit	3000	3000	25€/h
Distant unit	0	0	10€/h
	Transportation cost	Fixed cost for $P, P', A, A', B$ and $B'$	Fixed cost for $D$ and $E$
Local unit	60€/m <sup>3</sup>	10000 €	3000 €
Distant unit	60€/m <sup>3</sup>	20000 €	6000 €

The impact of the following parameters has been tested separately: demand, transportation cost, labour cost and fixed cost. For each data value, three results are given: (1) the modules to standardize, (2) the percentage of relocated sub-assemblies, and (3) the gain of standardization against basic product. In all cases, optimized supply chain is considered.

#### Variation of the labour cost

The variation of the labour cost only concerns the distant unit. The results are presented in Figure 4.8. The figure shows the variations of the gain (0.1 means a gain of 10% from the solution without standardization) and the variation of the relocation (1 for a total relocation, 0 for a total production in the local unit). The demand  $D$  is fixed to 3000.

When labour cost is low, *i.e.* under 8 €/per hour, relocation is high and standardization of  $P'$  has a great impact on the cost. The value of the optimal solution is then 12 percent above the value of the initial solution. When labour cost is high, above 12 €/h,  $A'$  has to be produced in the local unit. Therefore,  $A'$  standardization is possible while  $P'$  or  $B'$  labour cost would be too high. These results can be expressed as follows: since  $A'$  standardization cost comes only from transportation, the standardization is not penalized when transportation cost is high. On the contrary,  $P'$  standardization cost comes from both labour and transportation and is less penalized when labour cost is low.

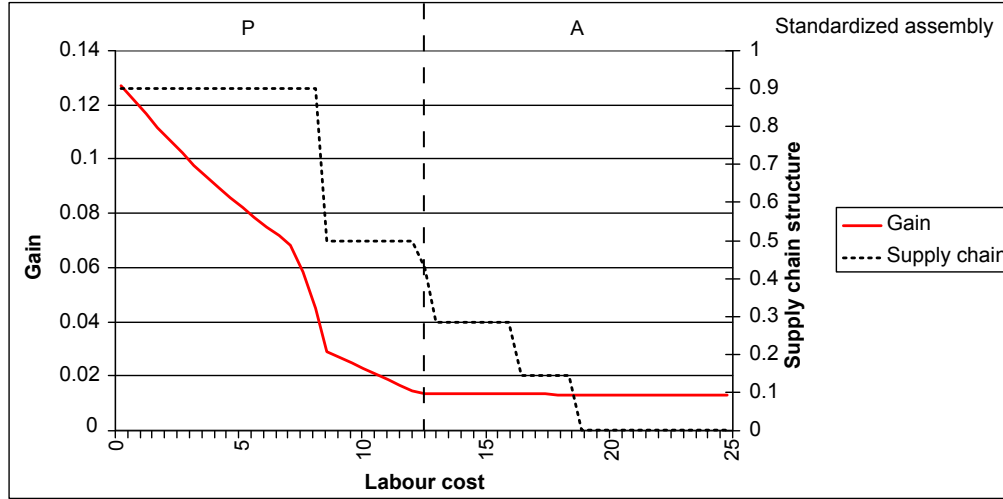


Figure 4.8 Gain of standardization and supply chain configuration - Labour cost variation ( $D = 3000$ )

### Variation of the fixed cost

The variations of the fixed cost concern also the distant unit. Results are presented in Figure 4.9. The figure presents the gain obtained and the impact on relocation. The fixed cost varies from  $0.1 \times Cf_i$  to  $10 \times Cf_i$ , which means that the fixed cost for the distant unit is calculated from the fixed cost in the local production unit. For this test, the demand is fixed to 3000.

The shape of the supply chain configuration curve is similar to the previous one. When the fixed cost grows in the distant unit, the relocation decreases from 1 to 0. The gain obtained by standardization is low. This gain is at most 1%. We note that the gain fluctuates from 0 to 1% and that the fluctuation seems to be not predictable. When fixed cost in the distant unit is between 0.3 and 1 % of the cost in the local unit, gain increases as *A* standardization saves one fixed cost. After 1%, fixed cost is higher in the distant unit. Therefore, the relocation becomes less advantageous. Between 2.1 and 4 %, relocation becomes costly and only *B* and its sub-assemblies can be relocated, *B* is then standardized. After 4%, only sub-assemblies *D* and *E* can be relocated: so *A'* is the best standardization option as extra cost mainly corresponds to transportation cost.

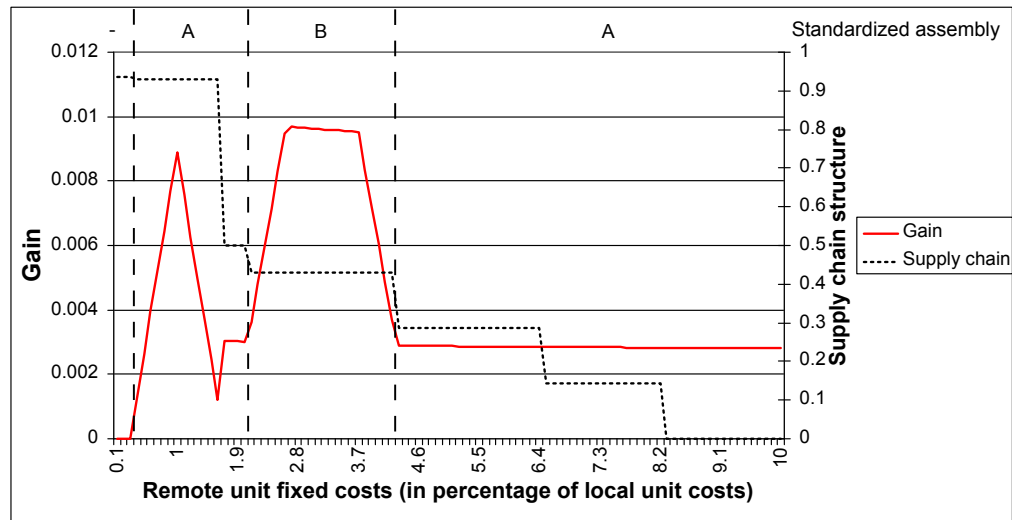


Figure 4.9 Gain of standardization and supply chain configuration - Fixed cost variation ( $D = 5000$ )

### Variation of the transportation cost

The variations of the transportation cost are now studied. Results are presented in Figure 4.10. The transportation cost varies from 0 to 200 and the demand is fixed to 2500.

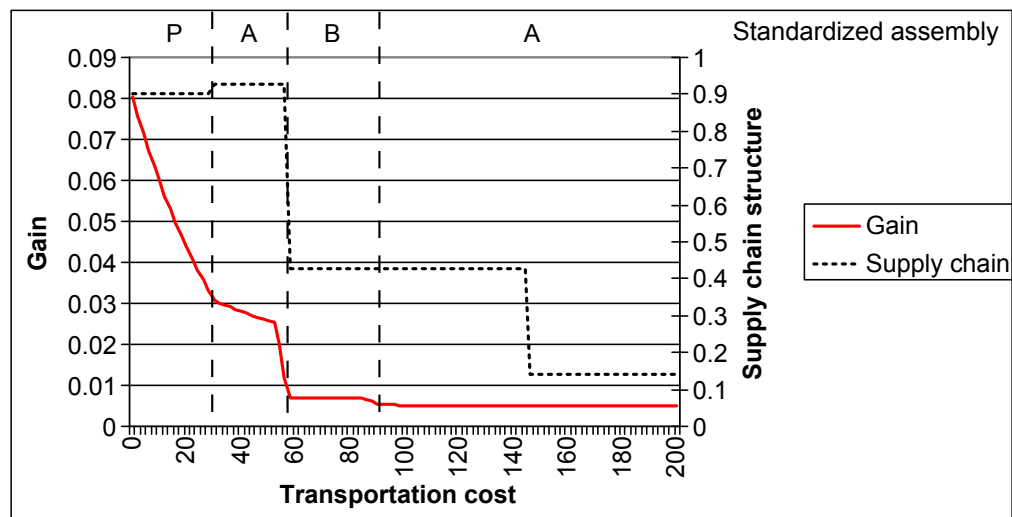


Figure 4.10 Gain of standardization and supply chain configuration - Transportation cost variation ( $D = 2500$ )

The shape of the curves is quite similar to the observation in Figure 4.8. When transportation cost increases, the distant unit is less interesting and the relocation of the production falls to 0. However, a slight difference appears when transportation costs are between 0 and 60. Within this interval, the number of relocated products grows. In fact, between 0 and 30, transportation cost is low enough to avoid the transportation in the supply chain : location choices for each sub-assembly can then be made independently. After 30, transportation cost is high enough to impact the decision. Then, relocation decisions have to be analyzed for each group of sub-assembly. For small transportation cost (less than 30) the whole product is standardized. From 30 to 60,  $A'$  is replaced by  $A$ ; from 60 to 90,  $B'$  is replaced by  $B$ . Afterwards,  $A'$  is again standardized. At the end, the pattern is similar to the pattern observed for fixed cost variation.

The gain obtained by the standardization varies between 8%, when the transportation cost is null, and to 0.5%, when the transportation cost goes to 60. The speed of the decrease is not regular and depends on the standardization politic. The gain is less than 1% when the transportation cost greater or equal to 60.

### Variation of the demand

The variations of the demand (from 100 to 10000) are now studied. Results are presented in Figure 4.11.

The gain due to standardization falls very quickly when the demand grows. When the demand is small (100), the gain is approximatively 30%, and the best strategy is then to replace  $P'$  by  $P$  and to product in the local unit. The same standardization strategy holds when the demand increases to 1800, but a part of the production is moved to the distant unit. When the demand varies between 1800 and 3000, only  $B'$  is standardized, a part of the production is relocated to the local unit and the gain is less than 2.5%. When the demand varies between 3000 and 4000, only  $A'$  is standardized. After 4000, the supply chain design remains the same until 4800. Then, the relocation percentage increases to 70%. Two phenomena are mixed. The inverse correlation between demand and standardization can be explained as follows : when a standardization option is selected, fewer different parts have to be managed, so fewer fixed costs have to be considered. At the same time, for each standardized part, larger quantities will occur, so variable costs for those parts increase. Therefore standardization benefit decreases with demand increase. The correlation between demand and relocation is also natural, as fixed costs become dominated by variable costs when demand increase.

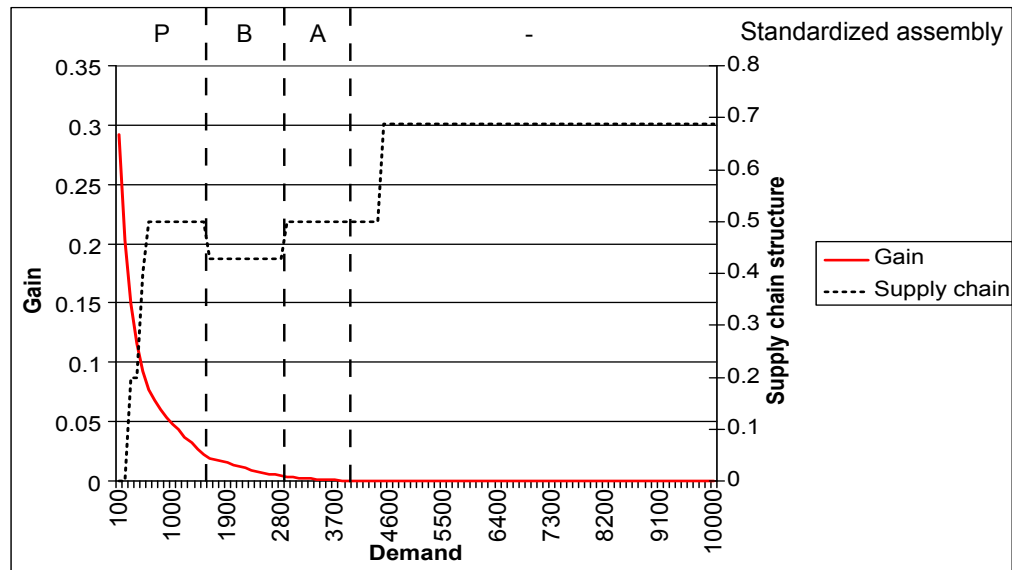


Figure 4.11 Gain of standardization and supply chain configuration - Demand variation

### Mutual impacts of demand and fixed cost on standardization strategies

To highlight the complexity of the joint product and supply chain design, Figure 4.12 shows the best standardization strategy and the supply chain design (which depends on two parameters: the demand and the fixed cost). The results are presented separately but the optimization is done simultaneously.

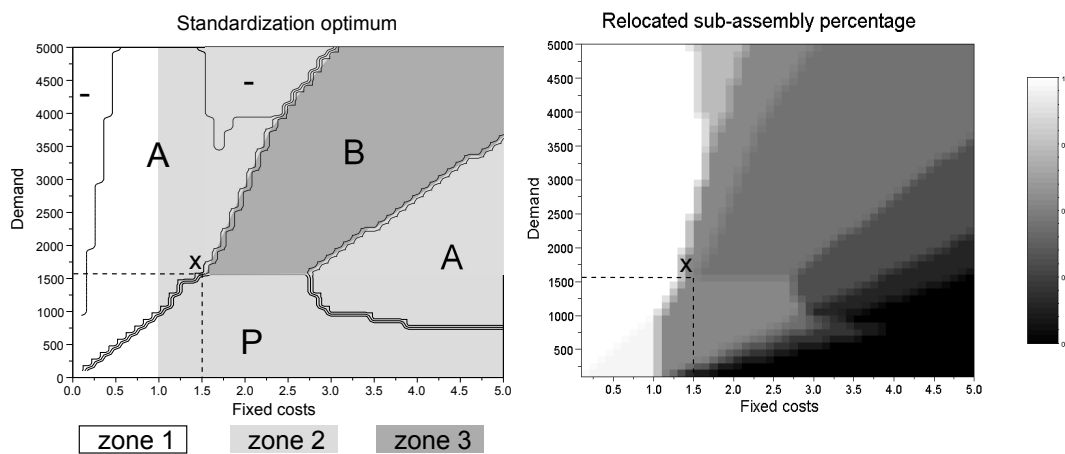


Figure 4.12 Demand and fixed cost variation

On the left chart of Figure 4.12, the optimal bill-of-materials is given by either the appropriate BOM or  $A$ ,  $B$  or  $P$  standardization. Three zones are considered to facilitate analyzes. On the right chart of Figure 4.12, the supply chain structure is given, using the same indicator than the one used in Section 4.4.2. 100% means that the whole production is relocated, while 0% means that all the manufacturing is done on the local unit.

Consider the point  $X$  (fixed cost=1.5, demand=1550). The optimal solution for  $X$  is to standardize  $A$  (left chart), and to relocate half of the sub-assemblies (right chart). If demand increases at 2500, standardization remains the same, but nearly all the sub-assemblies are relocated. If demand decreases at 1300,  $P$  is standardized and the supply chain remains the same. If fixed costs move to 2.0,  $B$  is standardized and 43% of the supply chain is relocated.

Figure 4.12 presents some typical behaviours of the model. As seen in Figure 4.11, standardization decreases with demand. However, some particular effects can be highlighted. In zone 1 (left chart), fixed costs are lower in the distant unit. The behaviour is different in zone 2 where fixed costs are higher in the distant unit. Zone 3 represents the area where  $B'$  is standardized and produced in the distant unit. When fixed cost is lower,  $B'$  standardization would be too costly in labour. When fixed cost is higher, distant manufacturing would be too expensive in fixed cost. Both standardization choice and supply chain design are highly sensitive.

### **Mutual impacts of demand and transportation cost on standardization strategies**

The complexity of the joint design can also be shown when the parameters are the demand and the fixed cost. Figure 4.13 uses the same type of graphics than Figure 4.12.

As the previous chart, these results respect the correlation between demand and standardization. Transportation cost variation is less predictable. In zone 1 in Figure 4.13, the whole production is done on the distant unit. In zone 2,  $P'$  is standardized and the supply chain goes from 90% to no sub-assembly relocated. In zone 3, supply chain design remains the same (about 43%), but the product standardization varies:  $B'$ , then  $A'$ , then nothing.

When point  $X$  is considered, the sensitivity of the model can be highlighted. With small variations of transportation cost and demand, the optimal design can be chosen between three different standardizations and four supply chain structures.



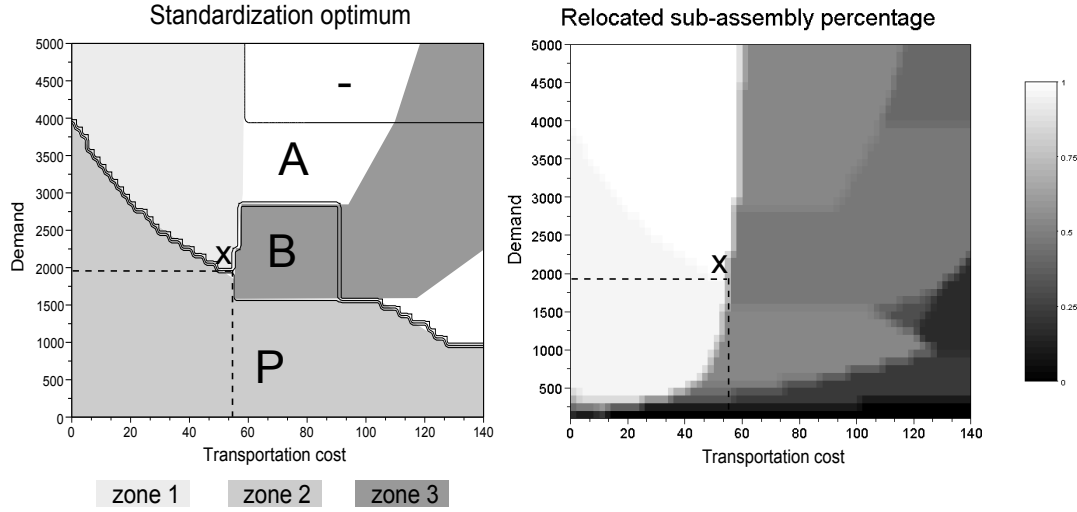


Figure 4.13 Demand and transportation cost variation

#### 4.5 Conclusion and further research

The aim of this study was to illustrate the relevance of optimizing simultaneously the supply chain with the product standardization. Using a mixed integer programming model for the supply chain decisions, the impact of the standardization choices on the optimal supply chain has been highlighted. Great impacts were shown on two types of problems: a multi-facility network where facilities are quite similar, and a network in a context of relocation.

Experiment results are used to outline the new model behaviour. A general trend is the correlation between standardization level and gain. This behaviour comes from the nature of the gain, in comparison with the solution without any standardization. When comparing other links between parameters, no generalization can be put forward. Either low or high level of standardization can be optimum with a supply chain where units are independent, as shown in Figures 4.6 and 4.11. The same conclusion can be made for the gain and for the supply chain structure. Gain can be obtained when supply chain is globalized, as seen in Figures 4.5, 4.8 and 4.10. Besides, opposite conclusion or no correlation occurs in Figure 4.9. As expected, demand is a key parameter. Variation of the demand has a great impact on cost and allows important benefit for standardization (up to 30% in our case studies). Transportation has a limited impact on standardization, because the adjustments mainly occur within the supply chain. Fixed cost has a very different impact in the two case studies: with similar units, the impact on gain and on supply chain is high; with different sort of

units, fixed cost plays yet a role on the supply chain structure, but the impact on the gain is very limited.

A small example showed that simultaneous decisions on standardization and on the supply chain structure may lead to better situations than sequential optimizations. This has been highlighted by different experiments. The impact of standardization can be huge in terms of cost. The issue is that the decision changes quickly when some parameters of the problem vary. Although the trends may sometime be anticipated, some behaviours can be difficult to predict. The complexity of the global optimization is shown with the 3D-charts of Figures 4.12 and 4.13.

There is a strong challenge to work on this problem because potential gains can be huge. When only a few sub-assemblies can be standardized, all possible configurations can be tested for standardization. For each configuration, the ideal structure of the supply chain and the cost can be determined. This method has been used for these experimentations. However, when standardization possibilities are numerous, it becomes necessary to include the standardization options in the mathematical model. The complexity of the model implies a thorough search for effective methods in order to improve routing.

As the decisions are very sensitive to variations of the parameters, it would be interesting to develop tools which allow sensitivity analysis of the proposed solutions. Figures 4.12 and 4.13 show that certain points are at the frontiers of three or four zones, each zone corresponding to a different strategy in terms of standardization and allocation of production. The aim would thus be to determine, for each parameter, an interval within which the overall decision remains stable.

The more challenging perspective of this work is to model the combined problem considering simultaneously the product standardization and the product allocation. This problem can be expressed as a MILP. However, the solution is highly complex due to the increase in the number of variables and constraints, each standardization possibility producing a new binary decision variable. Particular interests have to be given on solution methods. An iterative method which optimizes sequentially product and supply chain could be investigated, but with the risk to never find an optimal solution.

## CHAPITRE 5

### SIMULTANEOUS PRODUCT FAMILY AND SUPPLY CHAIN DESIGN: AN OPTIMIZATION APPROACH

**Abstract<sup>1</sup>:** This paper deals with the difficult problem of joint product family and supply chain design. We present a general model that simultaneously considers the construction of the bill of materials and the design of the supply chain network. For the bill of materials, product, sub-assembly and component substitution possibilities are considered. For the supply chain network, facility and distribution center location are considered as well as the choice of suppliers. A Mixed Integer Linear Program (MILP) model is proposed. The MILP formulation is solved optimally for medium size instances. For greater size instances, two heuristics derived from the MILP are designed. These methods are computationally tested on various instances from a generator conceived for this purpose.

**Keywords:** Supply chain design, Product family design, Mixed Integer Linear Programming

#### 5.1 Introduction

To respond efficiently to the customer's demand, companies propose diversified products. This diversity affects design, production and distribution processes. In this context, a great challenge is now to simultaneously design both the product family and its supply chain. This global optimization is the way to efficiently manage the trade off between the standardization that reduces costs, and diversification that potentially increases the sales.

Production and logistical constraints are already considered in the works on product family design through the concept of mass customization, developed by Pine (1993) Nepal *et al.* (2012). This technique is now a well spread design technique to achieve a large variety of product designs at minimum cost, for example, by considering product commonality Thonemann et Brandeau (2000) Shafia *et al.* (2009). As these problems are now well defined, optimization techniques have been used to determine product families Briant et Naddef (2004) Agard et Penz (2009).

More recently product family and supply chain design have been considered simultaneously. The need for global optimization has been highlighted independently by Baud-Lavigne

---

<sup>1</sup>Article soumis à International Journal of Production Economics

*et al.* (2012b) and Chen (2010), showing that decisions on the product design have a great impact on the supply chain design and also reciprocally. Supply chain design models that consider bill of materials (BOM) of products are also recent and rarely studied. A single-period, multi-product and multi-level model has been proposed by Paquet *et al.* (2004), and a multi-period model has been presented by Thanh *et al.* (2008). In their models, the BOMs are fixed, and consequently, only the supply chain is optimized. Other works on supply chain design include Yan *et al.* (2003), which highlights the role of BOM in supplier selection, Cordeau *et al.* (2006), which focuses on resolution methods as Benders decomposition and valid inequalities, Schulze et Li (2009a), which integrates the choice of modules and Hammami *et al.* (2009), which deals with relocation issues.

Very few studies deal with the simultaneous optimization of the product family and the supply chain. Appelqvist *et al.* (2004) presents a survey on the product and supply chain design. Two approaches are proposed in the literature. In the first, the authors define the best product family to meet the market needs by using generic BOM for the design of the product family (Lamothe *et al.* (2006) Zhang *et al.* (2008)). In these formulations, BOMs are determined to respect assembly constraints. In the second approach, authors consider that the final products are determined, but the BOM are more-or-less flexible. El Hadj Khalaf et al. El Hadj Khalaf *et al.* (2010) consider a modular design problem for which all the assemblies are possible, yet the final assembly time is constrained. Another way is to define several alternative BOMs ElMaraghy et Mahmoudi (2009), with one being selected in the optimal solution. Unfortunately, this approach needs a complete enumeration of all product configurations. Nevertheless, in this case, both mathematical formulation and solution search are facilitated. Recently, Chen Chen (2010) proposed an integrated model for product and supply chain design. Its main drawback is the high number of decision variables, thus large problems are difficult to solve.

The first contribution of this paper is to provide a mixed linear programming model for the global product and supply chain optimization problem that extends those already proposed in the literature. This is achieved with an extension of the model proposed by Paquet et al. Paquet *et al.* (2004) by including substitution possibilities. The second objective of the paper is to develop an efficient and exact algorithm to solve the model. Finally, for instances that are not tractable with the exact method, we propose an heuristic based on the linear programming relaxation of the MILP formulation.

The paper is organized as follows. Section 5.2 describes the problem and gives a mathe-

mathematical formulation. Exact and heuristic methods are presented in Section 5.3. Experiments are followed to test these propositions. Section 5.4 concludes the paper and gives some perspectives.

## 5.2 An optimization model for joint product and supply chain design

### 5.2.1 Model description

First of all, we present the product family design. The problem here is to precisely define the bill of materials of each final product that constitute the product family. For a product, the BOM must be composed by sub-assemblies and components. These sub-assemblies and components can also be a part of other products of the family. An example of BOM is given in Figure 5.1a. This example considers two products:  $P1$  and  $P2$ . Each product is composed of two sub-assemblies.  $P1$  is composed of sub-assemblies  $A$  and  $B$ , while  $P2$  contains  $A'$  and  $B'$ . Sub-assemblies are composed of components 1 to 5.

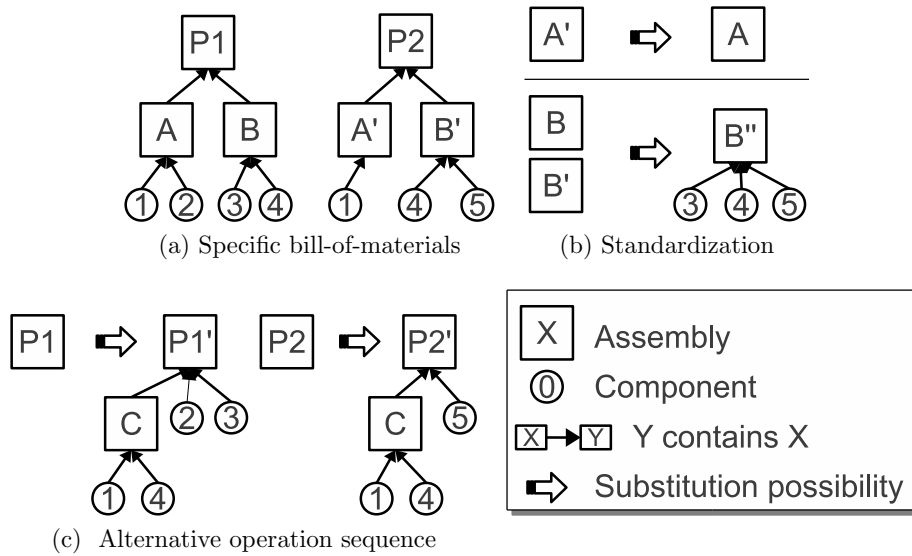


Figure 5.1 Bill-of-materials and substitution illustrations.

To define the BOM, substitution possibilities can be expressed through explicit equivalences between assemblies. Three types of substitution are considered:

**standardization:** a component (or sub-assembly) can be upgraded by another one with more functionalities or with a better quality. On one hand, individual parts may be more expensive to buy, to produce or to transport, so variable costs may increase. On the other hand, diversity decreases and allows for better economies of scale. An

illustration is provided in Figure 5.1b. Sub-assembly  $A'$  can be replaced by  $A$ ,  $B$  and  $B'$  can be replaced by a new sub-assembly  $B''$ ,

**externalization:** a sub-assembly is bought directly from a subcontractor. While avoiding production line, fixed costs are minimized and variable costs may increase because the subcontractor has to invest. Thus each unit should be sold at a higher price than if it was made internally. In the example in Figure 5.1a, the sub-assembly  $A$  or  $B$  can be replaced by a component bought from a supplier,

**alternative operating sequence/product decomposition:** other component assembling sequences can permit better commonality without necessarily changing costs. Figure 5.1c presents a sequence where sub-assembly  $C$  has a better commonality without adding extra function.

These possible substitutions of sub-assemblies or components in the BOM introduce a difficulty in the modeling. A typical way to express substitution is to use the BOM as a decision variable. This way leads to quadratic constraints between BOM and production decision variables in most supply chain design models. Another way, proposed in Chen (2010), is to use decision variables to express exactly which quantity of each alternative is used for each assembly produced. This leads to a considerable amount of decision variables. In our model, we simplify the approach. The product substitution is considered through product transformation. When part  $X$  is able to substitute part  $Y$ , a virtual process can transform  $X$  into  $Y$ . Then, a quantity of  $X$  on a plant is mixed between actual  $X$  parts and alternatives that have been transformed into  $Y$ . This modeling allows substitution while keeping a light formulation. Indeed, the number of additional variables is exactly the substitution possibilities.

Concerning the supply chain design, we consider a generic supply chain as depicted in Figure 5.2. In the generic supply chain, there are four layers: suppliers, production centers, distribution centers and customers. This example shows a supply chain with four suppliers, three production centers, three distribution centers and four customers. Flows contain only components between the suppliers and the production centers. They also only contain products between the plants and the customers and all types of parts (components, assemblies and products) between the different production centers. Workstations are also allocated to each production center.

The manufacture of each sub-assembly or product may require some specific technologies. For each technology, different options may be available. For example, for an assembly, we can propose a totally manual workstation (option 1) with a certain capacity, or a fully automated

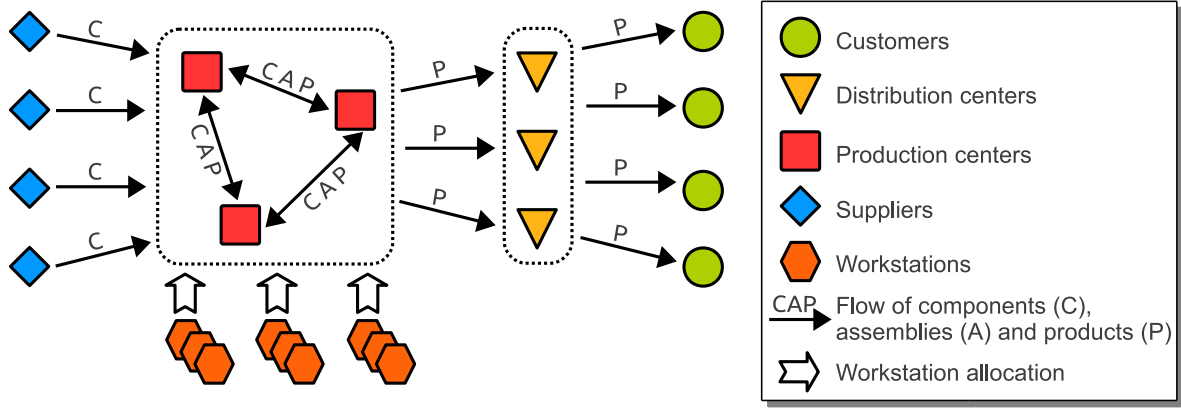


Figure 5.2 Schematic supply chain network.

one (option 2), using less square meters, producing in great quantity, but also more expensive to install; a third option could be an intermediate between those.

Finally, the objectives of the optimization are to determine:

1. the bill-of-materials composition: selection of the relevant components and sub-assemblies for each product,
2. the supplier, the distribution center and production center selection,
3. the components, assemblies and products flow,
4. the allocation of each assembly to each production center,
5. the allocation of workstations to each production center.

### 5.2.2 Mathematical formulation

The problem is modeled with flow and fixed cost constraints. Substitution possibilities are included at each level of the BOM (components, sub-assemblies and products). The supply chain and the product family are optimized simultaneously.

First of all, we define the following sets and indices:

- $\mathcal{P}$ : products ;  $p, q \in \mathcal{P}$ 
  - $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}$  : raw materials or supplied components
  - $\mathcal{M} \subset \mathcal{P}$ : manufactured products / sub-assemblies
  - $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}$ : finished products

- $\mathcal{P}^p \subset \mathcal{P}$ : products, sub-assemblies or components that can substitute  $p$
- $\mathcal{N}$ : network nodes ;  $i, j \in \mathcal{N}$ 
  - $\mathcal{S} \subset \mathcal{N}$ : suppliers
  - $\mathcal{U} \subset \mathcal{N}$ : production plants
  - $\mathcal{D} \subset \mathcal{N}$ : distribution centers
  - $\mathcal{C} \subset \mathcal{N}$ : customers
- $\mathcal{T}$ : technologies ;  $t \in \mathcal{T}$
- $\mathcal{T}^p \subset \mathcal{T}$ : technologies needed by product  $p$ ,  $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$
- $\mathcal{O}$ : capacity options ;  $o \in \mathcal{O}$
- $\mathcal{O}^t \subset \mathcal{O}$ : capacity options for technology  $t$

Parameters:

- $g^{pq}$ : quantity of  $q$  in  $p$ .  $q$  can be a component or a sub-assembly.  $g$  represents the bill-of-materials,  $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$ ,  $q \in \mathcal{R} \cup \mathcal{M}$ ,
- $d_i^p$ : demand of product  $p$  by customer  $i$ ,  $p \in \mathcal{F}$ ,  $i \in \mathcal{C}$
- $c^o$ : capacity of option  $o$ , in terms of total amount of time,  $o \in \mathcal{O}$
- $l^{pt}$ : processing time of product  $p$  on technology  $t$ ,  $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$ ,  $t \in \mathcal{T}$

The decision variables are as follows.  $A_i^p$  is the quantity of  $p$  manufactured in production center  $i$ .  $B_i^p$  is a binary variable that is equal to one if production center  $i$  is used to manufacture product  $p$ , zero otherwise.  $S_i^{pq}$  is the quantity of  $p$  that substitutes  $q$  in production center  $i$ .  $F_{ij}^p$  defines the flow of  $p$  from  $i$  to  $j$ .  $T_{ij}^p$  and  $L_{ij}$  are binary variables. The first one is equal to one when the flow of  $p$  from  $i$  to  $j$  is strictly positive, and the second one is equal to one when at least one product  $p$  uses the arc from  $i$  to  $j$ , zero otherwise. Each variable is associated with its proper cost. For the binary variables, the cost is a fixed cost paid only if the variable is set to one. For continuous variables, the cost is a unit cost. The decision variables and the costs are presented in Table 5.1.

The mathematical model is as follows. The objective function (5.1) minimizes procurement, production and transportation fixed and variable costs.



Table 5.1 Decision variables (DV) and their associated costs.

	DV	Domain	Cost
Quantity of $p$ produced on $i$	$A_i^p$	$\mathbb{R}$	$\alpha_i^p$
Production of $p$ on $i$	$B_i^p$	$\{0, 1\}$	$\beta_i^p$
Quantity of $p$ that substitute $q$ on $i$	$S_i^{pq}$	$\mathbb{R}$	$\sigma_i^{pq}$
Flow of $p$ between $i$ and $j$	$F_{ij}^p$	$\mathbb{R}$	$\phi_{ij}^p$
Use of flow of $p$ between $i$ and $j$	$T_{ij}^p$	$\{0, 1\}$	$\tau_{ij}^p$
Use of axis between $i$ and $j$	$L_{ij}$	$\{0, 1\}$	$\lambda_{ij}$
Number of option $o$ on $i$	$O_i^l$	$\mathbb{N}$	$\omega_i^l$
Use of node $i$	$Z_i$	$\{0, 1\}$	$\zeta_i$

$$\begin{aligned}
Z = \min & \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (A_i^p \alpha_i^p + B_i^p \beta_i^p) \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \sigma_i^{qp} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (F_{ij}^p \phi_{ij}^p + T_{ij}^p \tau_{ij}^p) \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} L_{ij} \lambda_{ij} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{o \in \mathcal{O}} O_i^o \omega_i^o \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} Z_i \zeta_i
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Constraints (5.2) to (5.6) are flow constraints. The sources are the component flows from the suppliers to the production centers, with the sinks being the final product flows to customers. Constraint (5.2) considers the flow of each manufactured assembly on each production center.

$$\begin{aligned}
A_i^p & + \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ji}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \\
& = \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}} g^{qp} A_i^q + \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} \\
& \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{M}
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Constraint (5.3) considers the flow of each component on each production center.

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in (\mathcal{S} \cup \mathcal{U}) \setminus \{i\}} F_{ji}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \\
&= \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}} g^{qp} A_i^q + \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} \\
& \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{R}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Constraint (5.4) considers the flow of each component on each supplier.

$$A_i^p = \sum_{j \in \mathcal{U}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{S}, \forall p \in \mathcal{R} \tag{5.4}$$

Constraint (5.5) considers the flow of each final product on each distribution center.

$$\sum_{j \in \mathcal{U} \cup \mathcal{D} \setminus \{i\}} F_{ji}^p = \sum_{j \in \mathcal{D} \cup \mathcal{C} \setminus \{i\}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{F} \tag{5.5}$$

Constraint (5.6) considers the flow of each final product on each production center.

$$A_i^p + \sum_{j \in \mathcal{U}} F_{ji}^p = \sum_{j \in \mathcal{D} \cup \mathcal{C} \setminus \{i\}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{F} \tag{5.6}$$

Constraint (5.7) insures that customer's demands are satisfied.

$$\sum_{j \in \mathcal{D}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} = \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} + d_i^p \quad \forall i \in \mathcal{C}, \forall p \in \mathcal{F} \tag{5.7}$$

Constraint (5.8) insures that  $B_i^p$  is set to one if a production of  $p$  occurs. It also insures that fixed costs are paid when a component is provided by a supplier or when an assembly is manufactured on a center.  $A_{max}^p$  is the upper bound of  $A_i^p \quad \forall i \in \mathcal{U}$ .

$$A_i^p \leq B_i^p A_{max}^p \quad \forall i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{P} \tag{5.8}$$

Constraint (5.9) insures that  $Z_i$  is set to one if plant  $i$  is used.

$$B_i^p \leq Z_i \quad \forall i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{P} \tag{5.9}$$

Constraint (5.10) defines the capacity of each technology needed on a center.

$$\sum_{p/u \in \mathcal{P}^p} l^{pt} A_i^p \leq \sum_{o \in \mathcal{O}^t} O_i^o c^o \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (5.10)$$

Constraint (5.11) insures that  $T_{ij}^p$  is set to one if the arc from  $i$  to  $j$  is used by at least one product  $p$ .

$$F_{ij}^p \leq T_{ij}^p A_{max}^p \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (5.11)$$

Constraint (5.12) insures that  $L_{ij}$  is set to one if at least one product uses the arc from  $i$  to  $j$ .

$$T_{ij}^p \leq L_{ij} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (5.12)$$

Constraint (5.13) limits substituted products to be used within the plant in which they were created.

$$\sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \leq \sum_{q \in \mathcal{M} \setminus p} g^{qp} A_i^q + \sum_{j \in \mathcal{C}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (5.13)$$

The size of the problem is  $\mathcal{O}(|\mathcal{P}|^2|\mathcal{N}| + |\mathcal{P}||\mathcal{N}|^2 + |\mathcal{L}||\mathcal{N}|)$  variables and  $\mathcal{O}(|\mathcal{P}||\mathcal{N}|^2 + |\mathcal{L}||\mathcal{N}|)$  constraints. The optimization problem is obviously NP-hard because it includes at least two NP-hard problems. The first one is the facility location problem: only one product, fixed costs for production centers opening, and transportation costs to deliver customers are considered. The second NP-hard sub-problem is the knapsack problem: if considering a unique production center, the proper set of options have to be selected assuring a minimum capacity while costing lower than an upper bound.

## 5.3 Experiments

### 5.3.1 Design of experiments

To provide extended experiments, a generator of product family with a high commonality index has been developed. Data sets are often a weak point of the analysis when considering multi-level BOM. In Paquet *et al.* (2004) and Baud-Lavigne *et al.* (2012b), only one BOM with three levels and nine items is tested ; in Thanh *et al.* (2008), BOMs are generated from a three-level structure (products, sub-assemblies, components). Our BOM generator is based on a root BOM (Figure 5.3a), from the parameter of Tables 5.2, 5.3 and 5.4.

Tables 5.2 and 5.3 define two different cost structures. Our experiments and analysis are led by the first cost structure. The second one is used to check the results. Table 5.4 defines

Table 5.2 Case study one characteristics

Type	Parameter	Value
Network node	Logistical cost	150 \$/m <sup>3</sup>
Customers	Prob demand	.3
Fixed costs	per (axe, product)	100 \$
	per axe	500 \$
	per (component, supplier) : $\alpha_i^p, \forall p \in \mathcal{R}, i \in \mathcal{S}$	500 \$
	per (product, plant) : $\alpha_i^p, \forall p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}, i \in \mathcal{U}$	13,000 \$
	per suppliers : $\zeta_i, \forall i \in \mathcal{S}$	10,000 \$
	per plants : $\zeta_i, \forall i \in \mathcal{U}$	50,000 \$
	per DC : $\zeta_i, \forall i \in \mathcal{D}$	20,000 \$
	Max Labour costs	30\$
	Min Labour costs	5\$
Product parts	Max procurement cost	20 \$
	Max physical volume	1 m <sup>3</sup>

Table 5.3 Case study two characteristics. Used to check case study one results

Type	Parameter	Value
Network node	Logistical cost	300 \$/m <sup>3</sup>
Customers	Prob demand	.3
Fixed costs	per (axe, product)	200 \$
	per axe	1000 \$
	per (component, supplier) : $\alpha_i^p, \forall p \in \mathcal{R}, i \in \mathcal{S}$	1000 \$
	per (product, plant) : $\alpha_i^p, \forall p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}, i \in \mathcal{U}$	50,000 \$
	per suppliers : $\zeta_i, \forall i \in \mathcal{S}$	5,000 \$
	per plants : $\zeta_i, \forall i \in \mathcal{U}$	200,000 \$
	per DC : $\zeta_i, \forall i \in \mathcal{D}$	100,000 \$
	Labour costs	30\$
	Min Labour costs	5\$
Product parts	Max procurement cost	20 \$
	Max physical volume	1 m <sup>3</sup>

the problems parameters. Five problems are tested, from small size (Prob.1) to larger size (Prob.5). For each problem, 20 instances are generated from the same parameter set with a

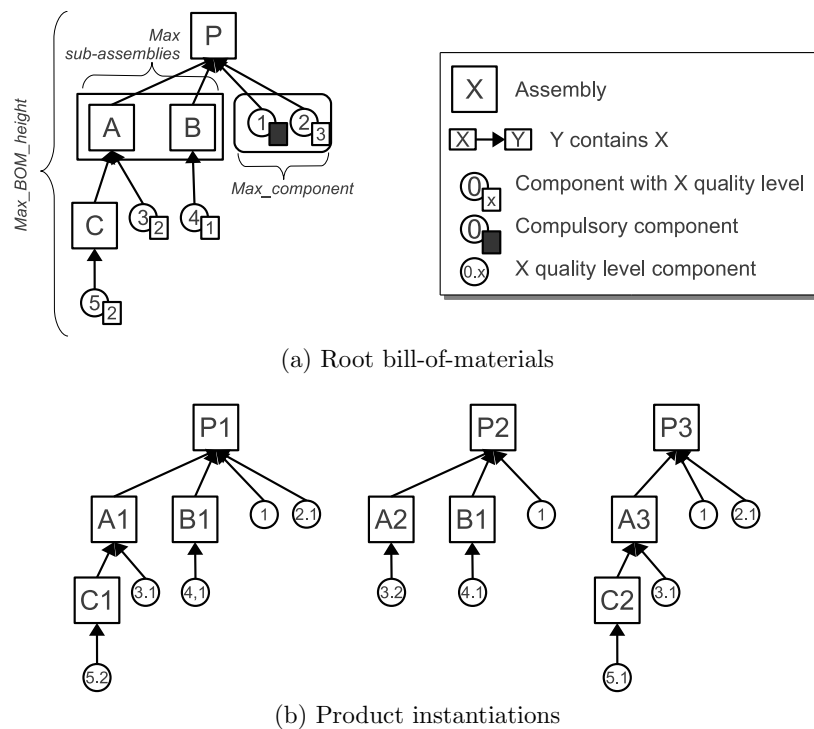
Table 5.4 Instance parameters

	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Prob. 4	Prob. 5
BOM height	2	2	3	3	4
Max. sub-assemblies	2	3	3	2	3
Max. components	2	3	3	3	3
Max. quality levels	3	3	3	3	3
Products	5	10	20	10	10
Customers	100	100	100	500	500
DC	1	2	5	5	15
Plants	10	10	10	10	15
Suppliers	15	50	30	50	50
Technologies	5	5	5	5	5
Options	1	1	3	5	3
Max demand	1000	500	500	1	50

different seed to generate random numbers. The size of the problems is homogeneous within an instance set, with only the supply chain characteristics changing while the product family is the same.

The root product is defined by a set of generic sub-assemblies, a set of components, volume (in  $m^3$ ) and processing time. Each generic sub-assembly is defined the same way until the maximum height is reached. Each component is unique and defined by a volume, a set of quality level, a cost for each quality level and a set of potential suppliers. Number of sub-assemblies (components) contained in each assembly follows a uniform law between 0 and the parameter *Maximum assemblies* (*Maximum components*).

Then, this generic product is instantiated once with a final product, depending on a quality target  $q$  and a level of functionality  $f$  randomly chosen. Figure 5.3b presents three instantiations of the root BOM of Figure 5.3a. Each component is instantiated, in that the component is either absent with a probability  $(1 - f)$ , or its quality level is chosen randomly around the target  $q$ . The set of components defines the sub-assemblies, and all the root sub-assemblies are instantiated recursively. An assembly is created if it is new, *i.e.* another assembly does not exist with the same components and sub-assemblies. Then, all the instantiated assemblies corresponding to the same root assembly are compared with each other: when an assembly is Pareto-dominant to another assembly *i.e.* all its components



and the components of its sub-assembly are of a worse quality, it is added to the substitution list. On the Figure 5.3b,  $A1$  and  $A2$  can not be compared, as  $A2$  has a better component 3 but no sub-assembly  $C$  ;  $A1$  can substitute  $A3$  ;  $P1$  can substitute  $P3$ .

From the supply chain perspective, all the data is generated from the parameters of Tables 5.2, 5.3 and 5.4 : number of suppliers, production centers and customers. Each node of the network has a specific geographic location, which is represented by coordinates between 0 and 1 ; those are used to calculate euclidean distance between units, thus transportation costs. A supplier is defined by a set of components that it can supply and a price level. A plant is defined by a labour rate. A customer is defined by its demand for each product : demand of a customer for a product is null with a probability *Prob demand* else between 0 and a maximum demand, following a uniform distribution.

Experiments are followed by solving the MILP presented in Section 5.2.2 with ILOG CPLEX 12 Java libraries on a server under 64 bits OS with a 2.27 GHz Intel Xeon CPU and 8GB of memory. One processor is used for the resolution.

### 5.3.2 Exact resolution

Results with exact resolution are presented in Tables 5.5 and 5.6. These tables show the mean resolution time for each problem, from less than one second (Prob.1) to about 30 minutes (Prob.5). The other results are presented in proportion to this reference time  $t_{ref}$  as  $t = \frac{t_{new}}{t_{ref}}$ .

Table 5.5 Mean resolution time for exact resolution with case study one (Table 5.2) in proportion to the reference time (on 20 instances)

	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Prob. 4	Prob. 5
Reference time (in s)					
Mean	0.793	11.325	275.371	175.627	1479.866
Min	0.456	4.888	18.493	25.737	93.959
Max	1.132	37.410	3600.040	489.417	3600.190
Time in proportion of the reference time					
Without substitution	0.295	0.231	0.267	9.361	0.887
Variables fixed					
All binary variables	0.031	0.008	0.005	0.002	0.003
$A_{max}^p$	0.439	0.332	0.327	0.030	0.170
Z	0.910	0.827	1.309	0.863	3.032
B	0.657	0.188	0.261	0.034	0.097
L	0.240	0.071	0.116	0.036	0.028
T	0.046	0.014	0.008	0.002	0.004

The impact of the substitution is tested first. On small problem (Prob.1, 2, 3), the resolution time is between three and five times faster without substitution. On larger problems (Prob.4 and 5), the gap is smaller or the substitution fasten the resolution. It seems there is no need to simplify this part of the model to help a heuristic.

With mixed variables, the branch and bound resolution technique is efficient on small instances. On larger problems, the quality of the lower bound is a key issue. Some binary variables make the problem difficult to solve optimally. In order to help building heuristics, several kinds of variable fixations are tested. By binding some variables with their optimal values, the aim is to analyze their influence on the resolution time.

To improve the lower bound, optimal values of  $A_{max}^p$  are used.  $A_{max}^p$  are fixed at their optimal value for each product by taking into account the quantity produced in the whole supply chain. The gain is from half on small instances to 3% of the reference time on large instances. With binding center opening and supplier selection (variables Z), the results fluc-

Table 5.6 Mean resolution time for exact resolution with case study two (Table 5.3) in proportion to the reference time (on 20 instances)

	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Prob. 4	Prob. 5
Reference time (in s)					
Mean	0.887	16.873	904.558	94.097	2277.515
Min	0.477	6.353	25.513	12.508	169.340
Max	1.566	83.814	3600.071	241.021	3600.293
Time in proportion of the reference time					
Without substitution	0.266	0.264	0.120	49.877	0.924
Variables fixed					
All binary variables	0.029	0.008	0.002	0.003	0.001
$A_{max}^p$	0.405	0.199	0.078	0.047	0.043
Z	0.854	0.973	0.873	0.786	1.102
B	0.633	0.157	0.094	0.061	0.054
L	0.205	0.063	0.037	0.032	0.011
T	0.043	0.015	0.003	0.003	0.001

tuates between small gain to increase of resolution time. With binding product implantation (variables  $B$ ), the gain is between 45% to 96% on large instances. With binding transportation axes (variables  $L$  and  $T$ ), the gain is extremely high ; from 75 to 99%. When the network is described, the solution is nearly entirely constrained. When all the binary variables are bounded, the gain is naturally the best, and slightly below the network binding.

### 5.3.3 Heuristics based on LP rounding

The LP relaxation of the problem can be easily solve with modern solvers. This gives a solution with real variables instead of binary ones. Rounding consists in fixing binary variables depending on their LP relaxation solution. The solution of this method is not necessarily optimal, but it allows for several variable binding. A heuristic based on rounding has been experimented by Thanh et al. Thanh *et al.* (2010) on a tactical supply chain design model, which gives encouraging results. When considering both product and supply chain design, fixing network variables ( $L$  and  $T$  variables) significantly improves the resolution while the solution is highly constrained.

To provide better quality solution, two heuristics have been developed using only information about product implantation ( $B$  variables).

- In heuristic  $H_1$ ,  $B$  variables are bounded to 0 when their optimal solutions in the LP



relaxation is null.

- In heuristic  $H_2$ , the same is done, plus  $B$  variables are bounded to 1 when their optimal solutions in the LP relaxation is not null.

$H_1$  is less constrained, thus it should be slower but closer to the optimal solution. Results are presented in Tables 5.7 and 5.8.

Table 5.7 Mean resolution time for heuristic resolution with case study one (Table 5.2) in proportion to the reference time and gap in comparison to the reference solution (on 20 instances)

	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Prob. 4	Prob. 5
$H_1$ Gap	0.000%	0.001%	0.002%	0.251%	0.004%
$H_1$ Time	1.549	0.426	0.387	0.265	0.160
$H_2$ Gap	0.013%	0.030%	0.004%	4.831%	0.018%
$H_2$ Time	0.605	0.223	0.254	0.181	0.085

Table 5.8 Mean resolution time for heuristic resolution with case study two (Table 5.3) in proportion to the reference time and gap in comparison to the reference solution (on 20 instances)

	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Prob. 4	Prob. 5
$H_1$ Gap	0.000%	0.004%	0.002%	0.090%	0.008%
$H_1$ Time	1.430	0.374	0.229	0.276	0.141
$H_2$ Gap	0.023%	0.049%	0.024%	6.510%	0.048%
$H_2$ Time	0.541	0.172	0.083	0.228	0.024

The gap is computed as follows:

$$Gap(i) = \frac{\text{heuristic cost}(i) - \text{optimal cost}(i)}{\text{optimal cost}(i)}$$

In problem 1, heuristic  $H_1$  is longer than the initial MILP resolution but its gap is nearly null, while heuristic  $H_2$  is about 40% faster with a cost at 0.1% from the optimum. The heuristics are more efficient while the problems grow :  $H_1$  gap is always better, at worse 0.3% of the optimal cost – 6.5% for  $H_2$  – with a resolution time between 42.6 and 16% of the MILP resolution – between 22.8 and 2.4% for  $H_2$ .

### 5.3.4 Resolution of larger instances

Both heuristics presented in Section 5.3.3 are helpful to find good solutions in a reasonable amount of time. In order to highlight such gain on large instances, problems presented in Table 5.9 are tested on the two heuristics. Problems 6 and 7 are balanced between complex

Table 5.9 Large instance parameters

	Prob. 6	Prob. 7	Prob. 8	Prob. 9
BOM height	4	4	4	2
Max. sub-assemblies	3	3	4	2
Max. components	3	3	3	2
Max. quality levels	3	3	3	3
Products	15	15	50	5
Customers	1000	1000	50	5000
DC	15	15	3	20
Plants	20	20	3	40
Suppliers	50	50	10	100
Technologies	5	5	2	15
Options	3	3	2	5
Max demand	1	500	100	100

products and supply chain. While problem 6 has low demand – so fixed cost is dominant – problem 7 has high demand. Problem 8 deals with very complex products and a simple supply chain. Finally, problem 9 represents simple products with a highly complex supply chain, up to 40 production centers. Heuristics are compared to the initial MILP resolution with Cplex. Results are presented in Tables 5.10 and 5.11:

- number of feasible solutions after 6 minutes
- number of best solutions within the three resolution methods
- mean gap from the best lower bound. The best lower bound for each instance comes from the MILP resolution when a solution is found, or else directly from the LP relaxation.

The MILP resolution does not succeed to find feasible solutions all the time, especially when the fixed costs are dominant (prob.6) or in the largest problem (prob.2). Heuristics

Table 5.10 Number of feasible and best solutions for Cplex and heuristic resolutions with case study one (Table 5.2) and gap in comparison to the best upper bound (on 20 instances, 6mn max per resolution)

	Prob. 6	Prob. 7	Prob. 8	Prob. 9
	# Best solutions / # Feasible solutions			
Cplex only	0 / 0	7 / 14	8 / 18	7 / 20
$H_1$	08 / 20	6 / 20	10 / 18	9 / 20
$H_2$	12 / 20	7 / 20	0 / 18	6 / 20
Mean gap from the best upper bound				
Cplex only		0.024%	0.362%	0.020%
$H_1$	52.540%	0.057%	0.321%	0.010%
$H_2$	57.333%	0.084%	0.598%	0.013%

Table 5.11 Number of feasible and best solutions for Cplex and heuristic resolutions with case study two (Table 5.3) and gap in comparison to the best upper bound (on 20 instances, 6mn max per resolution)

	Prob. 6	Prob. 7	Prob. 8	Prob. 9
	# Best solutions / # Feasible solutions			
Cplex only	0 / 0	6 / 12	9 / 18	9 / 20
$H_1$	11 / 11	8 / 16	9 / 18	3 / 20
$H_2$	9 / 20	6 / 20	0 / 18	8 / 20
Mean gap from the best upper bound				
Cplex only		0.0229%	0.1651%	0.0088%
$H_1$	52.1947%	0.0648%	0.1510%	0.0089%
$H_2$	54.5878%	0.1012%	0.2202%	0.0094%

gives better results, as  $H_1$  only fails in 15 instances (Table 5.11, prob.6 and 7), and  $H_2$  always finds a solution when available.

Concerning the quality of the solutions, the three techniques are well balanced apart from problem 6 for which the MILP gives no feasible solution, and problem 8, for which heuristic  $H_2$  is never better than the others. The value of the gap is difficult to analyze. As the lower bound is resulting from the LP relaxation, its quality depends on the dominance of variable costs on the cost function: when variable costs are dominant (prob.7), the LP relaxation is extremely close to the optimal solution, so the gap is nearly compared to the optimal value ; else, when fixed costs are dominant (prob.1), the lower bound is far from the optimal value, so that the gap is wider. However, this does not mean that the solution is far from the

optimal solution.

## 5.4 Conclusion

This paper tackles the difficult problem of joint product family and supply chain design. This issue has attracted more and more attention in recent years. However, most studies deal with a specific part of the problem, or they propose intractable models. The aim of this paper is to integrate product substitution into a supply chain design model without adding too many variables and constraints. We consider a problem in which the product family and demand is known and must be satisfied. Decisions include supply chain design – from the supplier selection, the plant location, the product allocation to their distribution – and bill-of-materials reconfiguration through substitution possibilities. The breakthrough of this paper is to consider substitution as product transformation. This allows for a simple inclusion of the substitution in most supply chain design models and avoids to add much resolution complexity. Indeed, experiments have shown that substitution does not significantly worsen, nor improve the resolution. The need for complex BOM generator has been highlighted, and one methodology is proposed to generate product family BOM as benchmarks. Finally, two heuristics based on LP rounding have been proposed which gives significant improvement in resolution length while giving good solutions.

Perspectives include :

- analysis of real case studies to characterize solution behaviours and to develop a decision-making tool. We need to determine the key variables and study the sensitivity of the solutions,
- exact methods to fasten the optimal resolution and more efficient heuristics,
- integration of sustainable design problematic. Products, as well as production and distribution processes, have an important impact on carbon emission. Preoccupations with sustainable design in product and supply chain design can be a critical success factor.

## CHAPITRE 6

### ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS IN JOINT PRODUCT AND SUPPLY CHAIN DESIGN OPTIMIZATION

**Abstract**<sup>1</sup>: Environmental concerns are more and more be taken into account by companies, because of legal issues and consumers preferences. We propose to integer environmental constraints within the design of a product family and its related supply chain. A mathematical model is proposed to optimize cost under carbon emission limitation, and another to optimize carbon emission under cost limitation. The impact of those constraints are analyzed by tightening them. Globally, good quality results can be obtain when the constraints are not too tight.

**Keywords:** Joint product and supply chain design, Green supply chain, Carbon footprint

#### 6.1 Introduction

Government regulations and consumer concerns are more and more focused on environmental impact of good's production and use. If the aim is not yet to minimize this impact, some limitation can be imposed to improve the brand image or to increase sells. A part of environmental impact is carbon emission. Brezet et Hemel (1997) analyze the sources of carbon emission within the product consumption and highlight the importance of the product life cycle : each step of its life, from design, to end-of-life, has an impact on carbon emission. A quantitative study has been presented by Tukker et Jansen (2006), describing the environmental impact depending on line of business and size of the area.

Concerning cost optimization issues, the need of joint optimization has been highlight by Baud-Lavigne *et al.* (2012b), showing that both decisions have impacts on each other. However, product and supply chain optimization have not been tackled simultaneously until recent years. Baud-Lavigne *et al.* (2012b) focus on a production network and compare sequential design with simultaneous design on a case study and with an analytic analysis. Considering explicit bill-of-materials (BOM) in supply chain design model is a recent field that is yet little studied. A single-period, multi-product and multi-level models has been proposed by Paquet *et al.* (2004), and a multi-period model has been presented by Thanh *et al.* (2008). In these models, BOM is fixed.

Very few studies optimize simultaneously the product and the supply chain. Two approaches

---

<sup>1</sup>Article soumis à Computers & Industrial Engineering

are listed in the literature. The first approach seeks to define the best product family which meets the market needs, by using generic BOM to model the product part of the problem (Lamothe *et al.* (2006), Zhang *et al.* (2008)). In these formulations, BOM are determined so as to respect assembly constraints. The second approach considers the final products as fixed, but the BOM are more-or-less flexible. To model this in an assembly-to-order context where the final assembly time is constrained, El Hadj Khalaf *et al.* (2010) considered function and modular design, in which all the assemblies are possible. ElMaraghy et Mahmoudi (2009) defined several alternative BOM, one being selected in the optimal solution. This approach needs a complete enumeration of all product configurations. In return, both formulation and solution are facilitated. The only fully integrated models to our knowledge have been proposed by Chen (2010) and Baud-Lavigne *et al.* (2011a).

Integration of environmental issues in supply chain design has been recently studied. Beamon (1999a) describes the issues and key parts of environmental integration. Beamon (2005) focuses on ethical considerations. Some approaches use an environmental objective function with multicriteria optimization Wang *et al.* (2011), or mixed with global cost function through direct cost of carbon footprint, considering taxes Chaabane *et al.* (2012).

The aim of this paper is to integrate carbon footprint constraints to extend the joint product and supply chain design modelling. Section 6.2 describes the model hypothesis and its mathematical formulation. Experiments on the impact of environmental constraints on cost and of cost constraint on carbon footprint optimization are followed in Section 6.3. Section 6.4 concludes the paper and gives some perspectives.

## 6.2 Integrating carbon footprints into joint product and supply chain design

Mathematical model proposed here extends Baud-Lavigne *et al.* (2012c). Previous modelling focus was exclusively on cost minimization. It considers a typical supply chain with suppliers, production center network, distribution centers and customers, and a product family. In each production center, a set of option can be implanted. Each option corresponds to a technology. Each assembly operation needs some technologies to be realized. The product family is composed of several products, defined by a bill-of-materials, with several levels. Within a family product, components and assemblies are shared, and some assemblies or components can substitute others. The aim of the optimization is to define the best product family and its supply chain so as to optimized production costs.

Carbon footprints are integrated through three levels : components, production and transportation. Each layer is included within the optimization.

**Component** choice can impact carbon footprint in several ways. First, different materials

for the same functionality can need different level of energy for extraction or to be prepared. Second, its recycling can be more or less easy and efficient. Finally, it can involve difference during the use, when energy consumption is not a key functionality ;

**Production** carbon footprints come from production center characteristics (is there water recycling ? efficient isolation ?), and from workstations implantation ;

**Transportation** carbon emission varies depending on the distance that products and components travel.

The problem is modeled with flow and fixed cost constraints. Substitution possibilities are included at each level of the BOM (components, sub-assemblies and products). The supply chain and the product family are optimized simultaneously, following either a cost or a carbon emission minimization target. First of all, we define the following sets and indices:

- $\mathcal{P}$ : products ;  $p, q \in \mathcal{P}$ 
  - $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}$  : raw materials or supplied components
  - $\mathcal{M} \subset \mathcal{P}$ : manufactured products / sub-assemblies
  - $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}$ : finished products
  - $\mathcal{P}^p \subset \mathcal{P}$ : products, sub-assemblies or components that can substitute  $p$
- $\mathcal{N}$ : network nodes ;  $i, j \in \mathcal{N}$ 
  - $\mathcal{S} \subset \mathcal{N}$ : suppliers
  - $\mathcal{U} \subset \mathcal{N}$ : production plants
  - $\mathcal{D} \subset \mathcal{N}$ : distribution centers
  - $\mathcal{C} \subset \mathcal{N}$ : customers
- $\mathcal{T}$ : technologies ;  $t \in \mathcal{T}$
- $\mathcal{T}^p \subset \mathcal{T}$ : technologies needed by product  $p$ ,  $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$
- $\mathcal{O}$ : capacity options ;  $o \in \mathcal{O}$
- $\mathcal{O}^t \subset \mathcal{O}$ : capacity options for technology  $t$

General parameters:

- $g^{pq}$ : quantity of  $q$  in  $p$ .  $q$  can be a component or a sub-assembly.  $g$  represents the bill-of-materials,  $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$ ,  $q \in \mathcal{R} \cup \mathcal{M}$ ,

- $d_i^p$ : demand of product  $p$  by customer  $i$ ,  $p \in \mathcal{F}, i \in \mathcal{C}$
- $l^{pt}$ : processing time of product  $p$  on technology  $t$ ,  $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}, t \in \mathcal{T}$
- $z_{max}$ : maximal global cost allowed

Environmental parameters:

- $c_i$ : carbon emission of unit  $i$
- $c^o$ : carbon emission of option  $o$  implantation
- $c^p$ : carbon emission of component or part  $p$
- $c_{ij}^p$ : carbon emission to transport part  $p$  from site  $i$  to site  $j$
- $c_{max}$ : maximal carbon emission allowed

The decision variables are as follows.  $A_i^p$  is the quantity of  $p$  manufactured in production center  $i$ .  $B_i^p$  is a binary variable that is equal to one if production center  $i$  is used, zero otherwise.  $S_i^{pq}$  is the quantity of  $p$  that substitutes  $q$  in production center  $i$ .  $F_{ij}^p$  defines the flow of  $p$  between  $i$  to  $j$ .  $T_{ij}^p$  and  $L_{ij}$  are binary variables. The first one is equal to one when the flow of  $p$  from  $i$  to  $j$  is strictly positive, and the second one is equal to one when at least one  $p$  uses the arc from  $i$  to  $j$ , zero otherwise. Each variable is associated with its proper cost. For the binary variables, the cost is a fixed cost paid only if the variable is set to one. For continuous variables, the cost is a unit cost. The decision variables and the costs are presented in Table 6.1.

Table 6.1 Decision variables (DV), their associated costs and carbon emissions.

	DV	Domain	Cost	Carbon emission
Quantity of $p$ produced on $i$	$A_i^p$	$\mathbb{R}$	$\alpha_i^p$	$c^p$
Production of $p$ on $i$	$B_i^p$	$\{0, 1\}$	$\beta_i^p$	
Quantity of $p$ that substitute $q$ on $i$	$S_i^{pq}$	$\mathbb{R}$	$\sigma_i^{pq}$	
Flow of $p$ between $i$ and $j$	$F_{ij}^p$	$\mathbb{R}$	$\phi_{ij}^p$	$c_{ij}^p$
Use of flow of $p$ between $i$ and $j$	$T_{ij}^p$	$\{0, 1\}$	$\tau_{ij}^p$	
Use of axis between $i$ and $j$	$L_{ij}$	$\{0, 1\}$	$\lambda_{ij}$	
Number of option $o$ on $i$	$O_i^l$	$\mathbb{N}$	$\omega_i^l$	$c^o$
Use of node $i$	$Z_i$	$\{0, 1\}$	$\zeta_i$	$c_i$
Global costs	$Z$	$\mathbb{R}$		
Global carbon emission	$C$	$\mathbb{R}$		



The mathematical model is as follows. The objective function (6.1) minimizes procurement, production and transportation fixed and variable costs.

$$\begin{aligned}
& \text{Min } Z \\
Z = & \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (A_i^p \alpha_i^p + B_i^p \beta_i^p) \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \sigma_i^{qp} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (F_{ij}^p \phi_{ij}^p + T_{ij}^p \tau_{ij}^p) \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} L_{ij} \lambda_{ij} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{o \in \mathcal{O}} O_i^o \omega_i^o \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} Z_i \zeta_i
\end{aligned} \tag{6.1}$$

The objective function (6.2) minimizes component, option implantation, transportation and unit carbon emission.

$$\begin{aligned}
& \text{Min } C \\
C = & \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{p \in \mathcal{R}} (A_i^p c^p) \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (F_{ij}^p c_{ij}^p) \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{o \in \mathcal{O}} O_i^o c^o \\
& + \sum_{i \in \mathcal{N}} Z_i c_i
\end{aligned} \tag{6.2}$$

Constraints 6.3 and 6.4 limits respectively the global cost and the carbon emission. When using objective function 5.1, constraint 6.4 is added ; When using objective function 6.2, constraint 6.3 is added.

$$Z \leq z_{max} \tag{6.3}$$

$$C \leq c_{max} \quad (6.4)$$

Constraints (6.5) to (6.9) are flow constraints. The sources are the component flows from the suppliers to the production centers, the sinks are final product flows to customers. Constraint (6.5) considers the flow of each manufactured assembly on each production center.

$$\begin{aligned} A_i^p &+ \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ji}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \\ &= \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}} g^{qp} A_i^q + \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} \\ &\forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Constraint (6.6) considers the flow of each component on each production center.

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in (\mathcal{S} \cup \mathcal{U}) \setminus \{i\}} F_{ji}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \\ &= \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}} g^{qp} A_i^q + \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} \\ &\forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{R} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Constraint (6.7) considers the flow of each component on each supplier.

$$A_i^p = \sum_{j \in \mathcal{U}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{S}, \forall p \in \mathcal{R} \quad (6.7)$$

Constraint (6.8) considers the flow of each final product on each distribution center.

$$\sum_{j \in \mathcal{U} \cup \mathcal{D} \setminus \{i\}} F_{ji}^p = \sum_{j \in \mathcal{D} \cup \mathcal{C} \setminus \{i\}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{F} \quad (6.8)$$

Constraint (6.9) considers the flow of each final product on each production center.

$$A_i^p + \sum_{j \in \mathcal{U}} F_{ji}^p = \sum_{j \in \mathcal{D} \cup \mathcal{C} \setminus \{i\}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{F} \quad (6.9)$$

Constraint (6.10) insures that customer's demands are satisfied.

$$\sum_{j \in \mathcal{D}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} = \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} + d_i^p \quad \forall i \in \mathcal{C}, \forall p \in \mathcal{F} \quad (6.10)$$

Constraint (6.11) insures that  $B_i^p$  is set to one if a production of  $p$  occurs. It insures also that fixed costs are paid when a component is provided by a supplier or when an assembly is manufactured on a center.  $A_{max}^p$  is the upper bound of  $A_i^p \quad \forall i \in U$ .

$$A_i^p \leq B_i^p A_{max}^p \quad \forall i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (6.11)$$

Constraint (6.12) insures that  $Z_i$  is set to one if plant  $i$  is used.

$$B_i^p \leq Z_i \quad \forall i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (6.12)$$

Constraint (6.13) defines the capacity of each technology needed on a center.

$$\sum_{p/u \in \mathcal{P}^p} l^{pt} A_i^p \leq \sum_{o \in \mathcal{O}^t} O_i^o c^o \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (6.13)$$

Constraint (6.14) insures that  $T_{ij}^p$  is set to one if the arc from  $i$  to  $j$  is used by at least one product  $p$ .

$$F_{ij}^p \leq T_{ij}^p A_{max}^p \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (6.14)$$

Constraint (6.15) insures that  $L_{ij}$  is set to one if at least one product uses the arc from  $i$  to  $j$ .

$$T_{ij}^p \leq L_{ij} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (6.15)$$

Constraint (6.16) limits substituted products to be used within the plant in which they were created.

$$\sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \leq \sum_{q \in \mathcal{M} \setminus p} g^{qp} A_i^q + \sum_{j \in \mathcal{C}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (6.16)$$

We define Problem 1 as the MILP using objective function (6.1) with constraint (6.4), Problem 2 as the MILP using objective function (6.2) with constraint (6.3),  $Z(c_{max})$  the optimal solution the Problem 1, and  $C(z_{max})$  the optimal solution the Problem 2. The differences of this model with Baud-Lavigne *et al.* (2012c) are the add of the constraint (6.4) in Problem 1 and the study of the Problem 2.

## 6.3 Experiments

### 6.3.1 Design of experiments

The supply chain of the academic case study is illustrated in Figure 6.1.



Figure 6.1 Case study: the supply chain.

Two areas are considered: Area 1 and Area 2. Two production center are available in each area, with labour rate of respectively 30 and 25  $\$/h$  (Area 1), 6 and 5  $\$/h$  (Area 2) . In Area 1, unit carbon emission are lower because of stricter regulation, with higher labour cost. Market is also different: in Area 1, demand is high for high quality products with many functionalities, whereas in Area 2, demand is focused on simpler products. Suppliers, distribution centers and customers are set randomly.

Table 6.2 shows the parameters used in this case study.

Transportation cost is computed with the part volume, the distance between the units and the logistical cost. As the model considers a mono period, all fixed costs represents the use on this period.

Three product families are tested (Table 6.3).

Instance 1 is medium sized, each component has between 1 and 4 alternatives. Instance 2 has the same characteristics than Instance 1 without any alternative. Instance 3 is a small instance with many alternatives.

A part can substitute another when it has more or better components.

The aim of the experiments is first to analyze how the optimal cost allocation is impacted by the carbon constraint, using Problem 1. Global carbon emission  $C$  is bound by  $c_{max}$ ,

Table 6.2 Case study characteristics.

Type	Parameter	Value
Network node	Logistical cost	100 \$/m <sup>3</sup>
	Logistical carbon emission	100 t
Customers	Quantity	50
	Prob demand	.3
	Max demand per product	1000
Fixed costs	per (axe, product)	200 \$
	per (component, supplier)	1000 \$
	per (product, plant)	50,000 \$
	per suppliers	5,000 \$
	per plants	200,000 \$
	per DC	10,000 \$
Product parts	Max carbon emission	10
	Max procurement cost	20 \$
	Max physical volume	1 m <sup>3</sup>

Table 6.3 Instance parameters

	Inst. 1	Inst. 2	Inst. 3
BOM height	2	2	1
Components	12	6	11
Sub-assemblies	23	12	3
Products	15	15	20
Max. quality levels	4	1	10

which varies between  $c_{min}$  and  $\alpha c_{min}$  ;  $c_{min}$  is the optimal global carbon emission when minimizing only carbon emission without any cost constraint. Then, the similar methodology is followed to analyze how the optimal carbon allocation is impacted by the cost constraint, using Problem 2.

Results are assessed through four criteria: cost level, its allocation between production, transportation and component, carbon emission level and its allocation on the same criteria, and the commonality index of the manufactured family product. Many commonality indexes have been described in the literature Thevenot et Simpson (2006). In this paper, the Extra Commonality Index (ECI) is proposed to measures the commonality brought by substitution

decisions. ECI is computed as following:

$$ECI = 1 - \frac{\# \text{ parts used} - \# \text{ parts min}}{\# \text{ parts max} - \# \text{ parts min}}$$

Parts contain components, high level assemblies and final products. The minimum number of parts ( $\# \text{ parts min}$ ) refers to the solution with a unique final product, which contains all the components at a high quality level: it can substitute every other products. The maximum number of parts ( $\# \text{ parts max}$ ) refers to the number of part in the initial BOM: there is no reason to produce other type of parts. ECI is between 0 (no extra commonality) and 1 (total commonality) and can differ because of substitution possibilities. First, additional components can be added to the sub-assemblies to increase standardization. Then, components can be substituted for lower carbon impact one – or higher quality one –, to have a lower carbon impact – or also to increase standardization. Initial commonality does not affect ECI.

Experiments are followed by solving the MILP presented in Section 6.2 with ILOG CPLEX 12 Java libraries on a server under 64 bits OS with a 2.27 GHz Intel Xeon CPU with 8 cores and 8GB of memory.

### 6.3.2 Cost function minimization with carbon emission constraint

Carbon emission constraint (constraint (6.4)) is added to analyze the cost structure which has to be found to respect a global carbon emission limit. This limit  $C_{max} = \alpha C_{min}$  is tested for  $\alpha \in [1, 3.5]$ . When  $\alpha = 1$ , resolving Problem 1 is the same than resolving Problem 2 without any cost constraint. When  $\alpha C_{min} \geq C(Z(\infty))$ , the carbon constraint is relaxed.

Figure 6.2 presents the Extra Commonality Index according to  $C_{max}$  variation. On the three tested instances, ECI increases with alpha. When the carbon constraint is tight, commonality is lower when more carbon emission is authorized.

Figures 6.3 present the cost allocation on the three instances according to  $C_{max}$  variation. Carbon emission allocation is not relevant, as it has not been optimized.

On instance 1, carbon emission constraint have little impact on cost. Optimal cost is reached when alpha is above 1.35. Under 1.35, gain is obtained mainly through transport reduction and some product cost variation. Instance 2 is more impacted by this constraint. When relaxing the constraint by 50%, cost can decrease by 30%. When alpha is under 1.7, gain is from transportation and product. Above 1.7, transportation continues to decrease while costs from components increase a little. Cost is optimal when alpha is above 2.9. On instance 3, three stages are visible. When alpha is under 1.1, global cost is high because of components, whose cost decrease by 30%, while transportation and production costs are stable. Between 1.1 and 1.9, the cost gradually decreases, mainly through component cost.

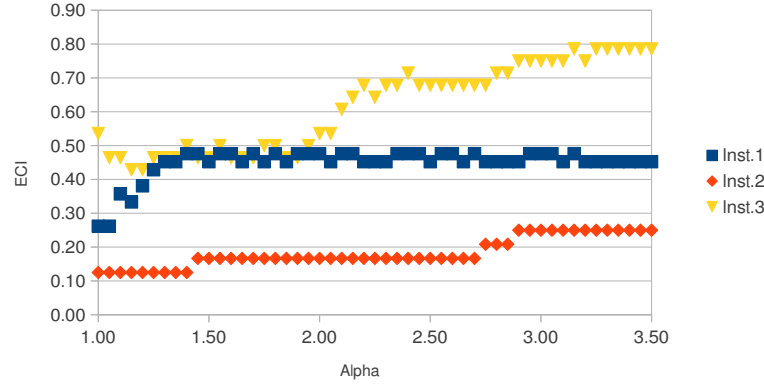


Figure 6.2 Extra Commonality Index (ECI) according to  $C_{max}$  variation ( $C_{max} = \alpha C_{min}$ ).

Above 1.9, the solution is stable.

### 6.3.3 Carbon emission function minimization with maximal cost constraint

Maximal cost constraint (constraint (6.3)) is added to analyze the carbon emission structure which has to be found to respect a global cost limit. This limit  $Z_{max} = \alpha Z_{min}$  is tested for  $\alpha \in [1, 3.5]$ . When  $\alpha = 1$ , resolving Problem 2 is the same than resolving Problem 1 without any carbon constraint. When  $\alpha Z_{min} \geq Z(C(\infty))$ , the cost constraint is relaxed.

Figure 6.4 presents the Extra Commonality Index according to  $Z_{max}$  variation. On the three tested instances, ECI decreases with alpha. When the carbon constraint is tight, commonality is higher when more carbon emission is authorized, with a large plateau between the extreme values.

Figures 6.5 present the carbon emission allocation on the three instances according to  $Z_{max}$  variation. Cost allocation is not relevant, as it has not been optimized. On instance 1, the solution is lowly impacted by cost constraint. Global carbon emission significantly decrease of 25% while alpha is under 1.1, mainly by component reduction. Between 1.1 and 1.25, the global emission is stable with a transfer from component source to transport. On instance 2, component emission deeply decreases by 90% when alpha goes from 1 to 1.6 while carbon footprints due to transportation slightly increase. The solution is stable above 1.5. On instance 3, three stages are visible. When alpha is under 1.1, global carbon emission deeply decreases by 40% thanks to components. Between 1.1 and 2.2, carbon emission from components gradually decreases while those from transport slightly increases. Above 2.2, the phenomena is inverted, as component slightly increases while transport decreases.

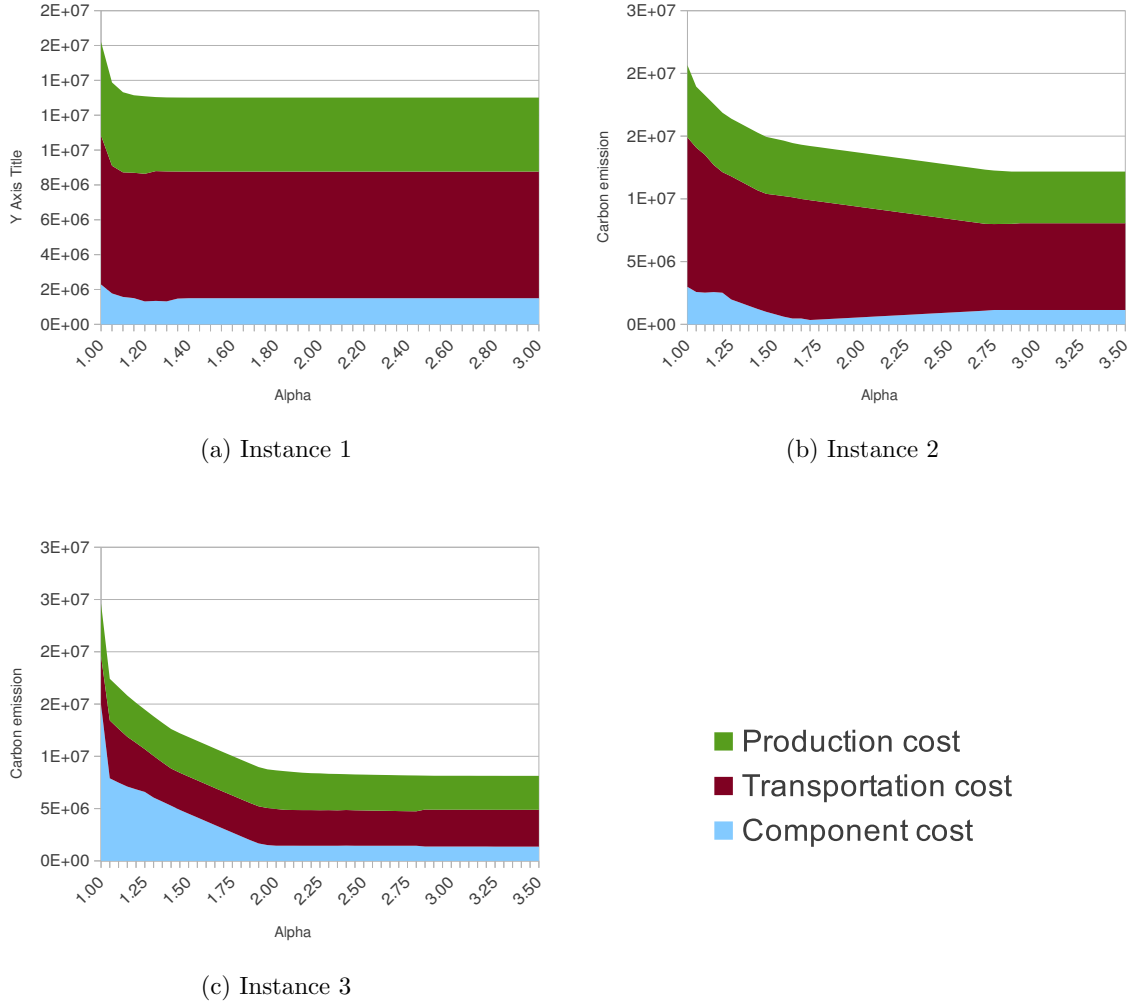


Figure 6.3 Cost optimization under carbon emission constraint variation.

### 6.3.4 Global analysis

Commonality increases when cost is the main issue (when the constraint on cost is tight for Problem 2, or when the constraint on carbon is loose for Problem 2). At the opposite, commonality is low when carbon emission is the priority. These effect on commonality is effective on all the instances, even the second where no alternative is considered. However, the impact on commonality is higher on instance 3 which has many alternatives. So standardization due to component outclassing is more impacted than the one due to component redundancy.

Concerning the cost and carbon emission allocation, a balance is found between components and transportation, the production is not much impacted by the constraints. On



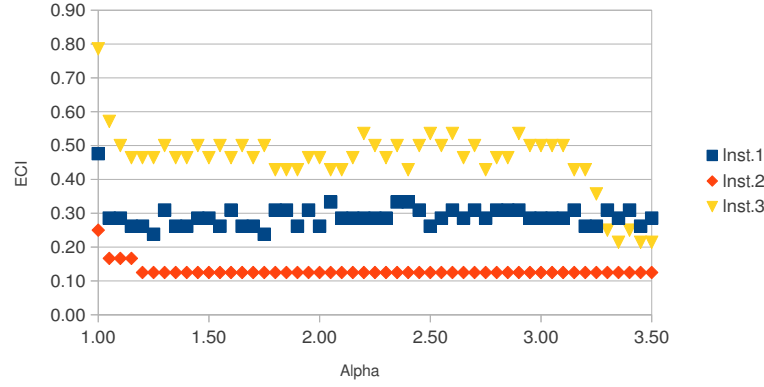


Figure 6.4 Extra Commonality Index (ECI) according to  $Z_{max}$  variation ( $Z_{max} = \alpha Z_{min}$ ).

instance 1 with problem 1 and 2 Figure 6.3a and 6.5a), the solution is stable when the constraint is not too tight (+10%). When considering cost optimization, the more flexibility we have, the less transport is used, so the production is done near the customers (Figure 6.3b). When carbon emission is optimized, it can be advantageous to increase transport so as to be able to gain on component costs (Figure 6.5c).

## 6.4 Conclusion

In this paper, we have proposed a way to deal with environmental issues, through carbon footprint optimization and as constraint. The analyze of the impact of cost constraint on carbon optimization shows that the optimal solution is extremely costly, whereas acceptable solutions exist when the constraint is looser. The analyzis of the impact of carbon constraint on cost optimization shows a slight peak where the impact of tight carbon constraint is really high on cost, then the cost is lightly impact by the carbon constraint. To assure a proper carbon emission (cost) limit, a balance is found between component and transportation cost (carbon emission).

Perspectives of this work is to include a wider range of sustainable development issues, by covering its three areas : economical, ecological and social. Concerning ecological issues, a methodology to assess the carbon emission precisely is needed to apply our proposition on an industrial case study. A social issue which is widespread is to work on keeping employment on some areas. The integration of minimum production level constraints in such production centers could be an efficient solution to take political decisions while keeping an optimized solution.

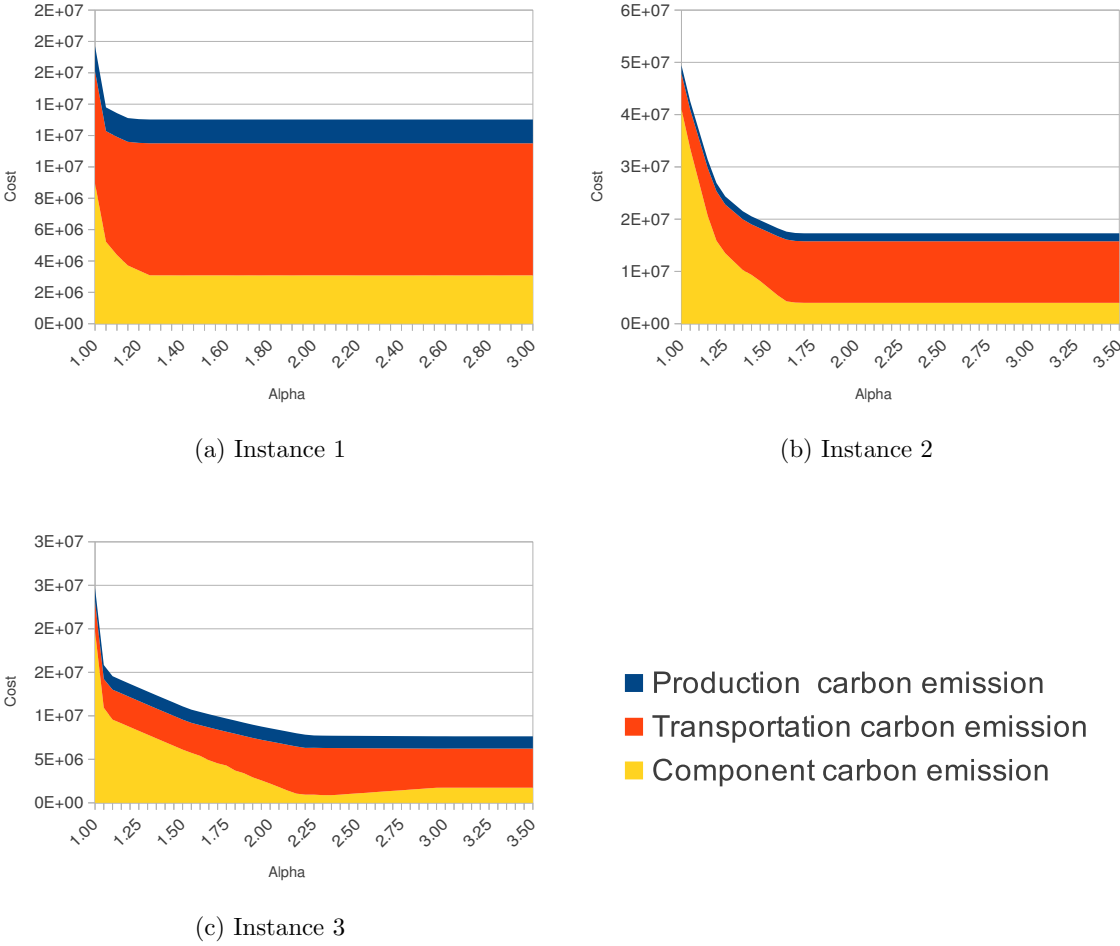


Figure 6.5 Carbon emission optimization under cost constraint variation.

## Troisième partie

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## CHAPITRE 7

### CONCLUSION

Au cours de ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à trouver une façon pertinente de lier la conception des produits et la conception de la chaîne logistique au sein d'entreprises manufacturières.

Dans le Chapitre 1, nous avons positionné le problème. Celui-ci fait appel principalement aux travaux liés à l'optimisation des réseaux logistiques, en intégrant une partie des décisions concernant la conception des produits pouvant être prises en phase d'industrialisation. Ces deux domaines d'étude ainsi que les enjeux de l'étude sont explicités afin de positionner le problème.

Nous avons présenté dans le Chapitre 2 un état des lieux des travaux sur les liens entre conception produits et conception de la chaîne logistique. Si cette problématique a attiré un certain nombre de travaux, le besoin d'un modèle d'optimisation de conception conjointe a été mis en évidence. La problématique de la prise en compte des aspects environnementaux a été abordée, en montrant d'une part qu'il est important de considérer tout le cycle de vie des produits, et d'autre part comment ces aspects ont été utilisés dans la conception des chaînes logistiques.

Les objectifs que nous nous sommes fixés durant ce travail ainsi que nos hypothèses ont été présentés dans le Chapitre 3. Nous nous intéressons particulièrement aux cas de personnalisation de masse dans des réseaux logistiques globalisés, pour lesquels les gains potentiels peuvent être importants. Les décisions concernant la conception des produits se limitent à des choix de substitution, qui englobent plusieurs réalités : la standardisation de produits, la définition de gammes alternatives et l'externalisation. Au niveau de la chaîne logistique, nous considérons les décisions de localisation des sites (de production et de distribution), d'allocation des produits dans le réseau logistique, l'implantation de moyens de production et la sélection des fournisseurs.

Nos contributions ont été exposées sous forme d'articles qui présentent notre démarche de façon cohérente.

Notre première contribution a été de justifier le besoin de modèles d'optimisation conjointe. Nous avons montré dans le Chapitre 4 que les processus de création de l'offre et de réalisation de l'offre, qui sont habituellement séquentiels, sont en réalité interdépendants. Notamment, nous montrons par un contre-exemple sur un modèle générique que des gains sont possibles grâce à l'optimisation simultanée des deux processus. Sur un cas d'étude pouvant être résolu

sans modèle d’optimisation, la complexité des solutions de ce type de modèle a été mise en évidence.

Nous avons donc modélisé le problème d’optimisation conjointe produits – chaîne logistique et présenté des méthodes de résolution dans le Chapitre 5. Après avoir étudié les limites de la résolution avec un solveur commercial, nous avons identifié les variables difficiles du modèle, principalement les variables binaires. Nous avons développé deux heuristiques basées sur l’arrondie des solutions de la relaxation linéaire donnant des solutions de bonnes qualités et permettant une réduction importante du temps d’exécution, notamment sur les grosses instances, pour lesquelles les solveurs commerciaux ne peuvent pas trouver de résultat. Notre apport a également été de développer un générateur d’instance pour la chaîne logistique, et surtout pour les familles de produits. La particularité de ce générateur est de permettre d’avoir des instances de produits de grandes tailles en maîtrisant la plupart des paramètres définissant une famille de produits (hauteur et largeur de nomenclature, commonalité entre les produits ...) tout en connaissant les possibilités de substitution.

Pour finir, le Chapitre 6 présente une analyse de la prise en compte de contraintes environnementales dans le modèle que nous proposons. Ces contraintes sont intégrées via les émissions carbone des composants, des sites de production et des installations et enfin du transport. Deux méthodes sont employées pour analyser l’impact de ces contraintes : l’optimisation des coûts avec une limitation plus ou moins importantes des émissions carbone, et l’optimisation des émissions carbone sous contraintes de coût.

## CHAPITRE 8

### DISCUSSION ET PERSPECTIVES

La démarche suivie dans cette thèse a permis de faire émerger un certain nombre de pistes de recherche et d'en approfondir une partie. Dans la continuité directe de ce travail, les autres pistes qui nous paraissent importantes à traiter sont présentées ci-après.

#### Limites et améliorations des propositions

Le modèle que nous avons proposé en Chapitre 5 a été développé de manière à être utilisation facilement en industrie. Cependant, quelques améliorations peuvent être apportées afin de mieux prendre en compte les différentes réalités industrielles :

- L'intégration explicite des taux de change et des taxes entre les différents pays ;
- Le choix de différents modes de transport ;
- La prise en compte des délais de transport, d'approvisionnement, de fabrication ;
- La gestion de différent niveaux de qualité selon les sites de production et des composants ;
- Les stocks intermédiaires. La multiplication des sites de production et des étapes de transport engendre des stocks dont le coût peut être évaluer afin de prendre en compte le coût des immobilisations ;
- Une chaîne logistique plus flexible. Si le réseau logistique entre les sites de production est générique, la structure de la chaîne globale est imposée (fournisseurs - production - distribution - clients) ;
- Des méthodes de résolution exactes performantes. Actuellement, nous sommes capables de résoudre des instances de l'ordre d'une quinzaine de sites de production avec une famille de produits d'une centaine d'assemblage en quelques heures.

#### Approche globale du développement durable

Les aspects produits et logistiques ont tous deux un impact fort sur les trois composantes – économique, écologique et sociétale – du développement durable. Nous avons exploré partiellement deux facettes de celui-ci dans le Chapitre 6 : l'optimisation des coûts de production

et d'acheminement et l'optimisation de l'empreinte carbone globale de ce processus. Une approche intégrée prenant en compte plus d'aspects du développement durable aurait d'une part des applications pertinentes en milieu industriel et d'autre part fournirait des problèmes académiques intéressants à étudier.

**Marché des droits à polluer.** Les travaux autour des émissions carbone dans l'optimisation de la chaîne logistique se sont d'abord intéressés à intégrer cette composante dans des modèles existants visant l'optimisation des coûts, comme dans les travaux de Chaabane *et al.* (2012). Pour cela, les émissions carbone sont considérées comme des coûts ou des profits provenant d'un marché des droits à polluer. En effet, les législations en vigueur instaurent des quotas d'émission carbone, échangeables sur un marché, visant à réguler les actions des industriels en matière de pollution sans être trop coercitif. Lorsque les prix du marché sont suffisamment importants, une production polluante aura un coût à prendre en compte, et à l'inverse une production raisonnée permettra de vendre des droits. L'idée ici est d'avoir une démarche en avance sur les législations, qui ne prennent pas encore en compte l'intégralité des aspects décrits dans le Chapitre 6, comme par exemple le choix des composants ou des fournisseurs.

**Optimisation multicritères coût - impact environnemental.** Une approche complémentaire est de ne plus seulement optimiser une fonction de coût plus ou moins complexe, mais de chercher de bons compromis entre l'optimisation de la fonction de coût et de la (ou les) fonction(s) environnementale(s), via une optimisation multicritères. Celle-ci est couramment utilisée pour l'optimisation de l'impact environnemental d'un processus, car les différentes composantes, dont l'empreinte carbone, ne sont pas additionnables. Cela permet une étude plus fine destinée principalement à des outils d'aide à la décision qualitatifs.

**Intégration de la demande comme variable endogène.** Nos travaux considèrent une demande connue et déterministe pour l'ensemble de la famille de produits et des clients. Si un intérêt fort est porté sur la prise en compte des incertitudes et des risques dans les modèles d'optimisation logistique, l'influence de l'empreinte carbone d'un produit sur le comportement des acheteurs n'a pas été, à notre connaissance, intégrée dans ce type de modèle. Deux approches sont ici possibles. La première est de déterminer à la fois la famille de produits et sa chaîne logistique, comme l'ont fait Lamothe *et al.* (2006) sans prendre en compte les impacts environnementaux. La seconde est de garder une approche proche de celle décrite en Section 3.2.2, en considérant que la famille de produits a été conçue, l'inconnue restant la manière dont ces produits vont être fabriqués. Selon les choix de production (localisation, transport, composants ...), l'empreinte carbone

des produits varie et peut avoir un impact sur les choix des consommateurs. Une tendance actuelle est en effet d'indiquer aux acheteurs des informations environnementales du produit, telles que la consommation (en énergie, en eau . . . ), le lieu de production ou l'empreinte carbone. Il serait alors pertinent de considérer ces choix dans les décisions de production en anticipant les impacts de ces facteurs sur les variations de demande.

**Influence éthique des choix d'implantation de la production.** Les impacts sociétaux des décisions de localisation de la production sont difficiles à évaluer quantitativement, mais restent néanmoins très important sur l'image d'une entreprise et dans les comportements des consommateurs. Par exemple, l'entreprise suédoise Ikea essaie de produire dans chaque pays où elle implante un magasin. Il est alors important de garder de la flexibilité dans ces contraintes afin de garder des marges de manœuvre. Une première approche est de contraindre un niveau de production minimal dans certains pays ou zones géographiques, afin de donner un signal fort aux clients, ou de ne pas bouleverser les choix d'implantation précédents. Une étude des impacts de ce type de contraintes a été présentée par Baud-Lavigne *et al.* (2011a).

### Détermination de nomenclatures uniques

Le modèle proposé dans le Chapitre 5 permet d'intégrer les choix de substitutions à un modèle d'optimisation logistique sans avoir un impact significatif sur sa complexité. Pour cela, les nomenclatures des produits ne sont pas contraintes et peuvent, pour un produit donné, différer d'un site à l'autre, voire sur le même site de production. Si cela permet une solution optimale du point de vue de la fonction de coût utilisée, des conséquences difficilement quantifiables sont à prendre en compte : réactions des consommateurs si deux produits a priori identiques diffèrent de part leurs composants, lourdeur en production pour prendre en compte la multiplicité des modes opératoires, et difficulté de la gestion du service après-vente. Il paraît alors pertinent de contraindre les choix de production à une seule nomenclature par produit, de façon globale, par zone de commercialisation, ou par site de production.

Pour garder un modèle linéaire, une première approche serait d'ajouter des variables de décision plus précises, décrivant à quoi vont servir les substitutions, telles que présentées par Chen (2010).

Une seconde approche serait de générer un ensemble de nomenclatures possibles et d'ajouter des variables de décision booléennes déterminant les nomenclatures retenues en production, afin de pouvoir rajouter des contraintes sur le nombre de nomenclatures de production par produit. Du fait du nombre exponentiel de nomenclatures à générer, il n'est pas possible d'énumérer et d'ajouter au modèle toutes les possibilités. Un des enjeux est de déterminer



quelles nomenclatures sont *a priori* intéressantes. Une résolution en deux phases (génération des nomenclatures, puis optimisation) est permise par cette méthode itérative : après une première résolution, il est possible de rajouter des nomenclatures pertinentes au modèle pour améliorer la solution. Une méthode de résolution basée sur la génération de colonnes semble alors bien adaptée à ce type de modèle.

### **Prise en compte des cycles de vie des produits en production**

Nous nous sommes concentrés dans ces travaux sur des modèles mono-périodes, considérant une demande stable sur une période donnée. Or, le cycle de vie d'une famille de produits possède des phases de montée en charge, de déclin et de renouvellement qui diffèrent pour chaque produit de la famille. Plusieurs aspects sont à prendre en compte :

- la plupart du temps, seuls quelques produits sont lancés au début, afin de diminuer les risques (en production et commercialement). La gamme est ensuite élargie petit à petit ;
- pour un produit donné, les volumes de production ne sont pas constant durant son cycle de vie : montée en charge en début de vie, déclin progressif en fin de vie ;
- le renouvellement des produits en fin de vie peut impliquer que plusieurs produits proches se chevauchent en production.

Les aspects prédominants sont alors d'ordre tactique : comment adapter la fabrication à ces variations anticipées de production ? En considérant un modèle multi-périodes, les décisions de réallocation des moyens de production et d'adaptation des produits prennent tout leur sens.

## RÉFÉRENCES

- AGARD, B., DA CUNHA, C. et CHEUNG, B. (2009). Composition of module stock for final assembly using an enhanced genetic algorithm. International Journal of Production Research, 47, 5829–5842.
- AGARD, B. et KUSIAK, A. (2004). Data mining for subassembly selection. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126, 627–631.
- AGARD, B. et PENZ, B. (2009). A simulated annealing method based on a clustering approach to determine bills of materials for a large product family. International Journal of Production Economics, 117, 389–401.
- APPELQVIST, P., LEHTONEN, J. et KOKKONEN, J. (2004). Modelling in product and supply chain design : literature survey and case study. Journal of Manufacturing Technology Management, 15, 675 – 686.
- ARNTZEN, B. C., BROWN, G. G., HARRISON, T. P. et TRAFTON, L. L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. Interfaces, 25, 69–93.
- BARAJAS, M. et AGARD, B. (2009). Fuzzy product configuration based on market segmentation to form a family of products. 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Grenoble, France.
- BASSETT, M. et GARDNER, L. (2010). Designing optimal global supply chains at dow AgroSciences. Annals of Operations Research, doi : 10.1007/s10479-010-0802-2.
- BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2010). Impact de la standardisation sur la conception intégrée d’une chaîne logistique dans un contexte d’internationalisation. Proceedings of 8ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation-MOSIM. Hammamet, Tunisie.
- BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2011a). Impacts of minimum activity level and multi-sourcing on product family and supply chain design. T. K. Dieter Spath, Rolf Ilg, éditeur, International Conference on Production Research (ICPR 21) : Innovation in Product and Production July 31 - August 4, 2011 in Stuttgart, Germany ; Conference Proceedings. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Allemagne, CD-rom. ISBN 978-3-8396-0293-5 OSP OSP.

BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2011b). A MILP model for joint product family and supply chain design. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'2011). International Institute for Innovation, Industrial Engineering and Entrepreneurship (I4e2), Metz, France, 889 – 897. ISBN 978-2-9600532-3-4.

BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2011c). Un nouveau modèle pour la conception conjointe d'une famille de produits et de sa chaîne logistique avec standardisation, externalisation et gammes alternatives. Congrès International de Génie Industriel. Saint-Sauveur, Canada, CD-rom. OSP OSP.

BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2012a). Environmental constraints in joint product and supply chain design optimization. Soumis à Computers & Industrial Engineering.

BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2012b). Mutual impacts of product standardization and supply chain design. International Journal of Production Economics, 135, 50–60.

BAUD-LAVIGNE, B., AGARD, B. et PENZ, B. (2012c). Simultaneous product family and supply chain design : An optimization approach. Soumis à International Journal of Production Economics.

BEAMON, B. (2005). Environmental and sustainability ethics in supply chain management. Science and Engineering Ethics, 11, 221–234.

BEAMON, B. M. (1999a). Designing the green supply chain. Logistics Information Management, 12, 332 – 342.

BEAMON, B. M. (1999b). Measuring supply chain performance. International Journal of Operations & Production Management, 19, 275 – 292.

BOUCHRIHA, H. (2002). Faire ou faire-faire dans la conception d'une machine logistique : un outil d'aide à la décision. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

BREZET, H. et HEMEL, C. V. (1997). EcoDesign : A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption. United Nations Environment Programme, Industry and Environment, Cleaner Production.

- BRIANT, O. et NADDEF, D. (2004). The optimal diversity management problem. Operations Research, 52, 515–526.
- CAKIR, O. (2009). Benders decomposition applied to multi-commodity, multi-mode distribution planning. Expert Systems with Applications, 36, 8212–8217.
- CAMUFFO, A., FURLAN, A., ROMANO, P. et VINELLI, A. (2006). The process of supply network internationalisation. Journal of Purchasing and Supply Management, 12, 135–147.
- CHAABANE, A., RAMUDHIN, A. et PAQUET, M. (2009). Designing supply chains with sustainability considerations. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. Montreal, Canada.
- CHAABANE, A., RAMUDHIN, A. et PAQUET, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. International Journal of Production Economics, 135, 37–49.
- CHAKRAVARTY, A. et BALAKRISHNAN, N. (2001). Achieving product variety through optimal choice of module variations. IIE Transactions, 33, 587–598.
- CHEN, H.-Y. (2010). The impact of item substitutions on production-distribution networks for supply chains. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 46, 803–819.
- CHEN, H.-Y., LIN, C.-W. et YIH, Y. (2007). Production-distribution network design of a global supply chain alliance from the key player's perspective. International Journal of Production Research, 45, 245–265.
- CHOUMAN, M., CRAINIC, T. G. et GENDRON, B. (2009). A cutting-plane algorithm for multicommodity capacitated fixed-charge network design. Rapport technique, CIRRELT, Montreal.
- COHEN, M. et MOON, S. (1991). An integrated plant loading model with economies of scale and scope. European Journal of Operational Research, 50, 266–279.
- COPACINO, W. C. (1997). Supply chain management : The basics and beyond. CRC Press.
- CORDEAU, J.-F., LAPORTE, G. et PASIN, F. (2008). An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment. International Journal of Production Economics, 113, 626–640.

- CORDEAU, J.-F., PASIN, F. et SOLOMON, M. (2006). An integrated model for logistics network design. Annals of Operations Research, 144, 59–82.
- DA CUNHA, C. (2004). Définition et gestion de produits semi-finis en vue d'une production de type 'assemblage à la commande'. Thèse de doctorat, Grenoble INP.
- DA CUNHA, C., AGARD, B. et KUSIAK, A. (2007). Design for cost : Module-based mass customization. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 4, 350–359.
- DAS, K. (2011). A quality integrated strategic level global supply chain model. International Journal of Production Research, 49, 5–31.
- DESAI, P., KEKRE, S., RADHAKRISHNAN, S. et SRINIVASAN, K. (2001). Product differentiation and commonality in design : Balancing revenue and cost drivers. Management Science, 47, 37–51.
- DOGAN, K. et GOETSCHALCKX, M. (1999). A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems. IIE Transactions, 31, 1027–1036.
- DOWLATSHAHI, S. (1996). The role of logistics in concurrent engineering. International Journal of Production Economics, 44, 189–199.
- DOWLATSHAHI, S. (1999). A modeling approach to logistics in concurrent engineering. European Journal of Operational Research, 115, 59–76.
- EL HADJ KHALAF, R. (2009). Définition des nomenclatures et des sources d'approvisionnement pour la fabrication d'une famille de produits. Thèse de doctorat, Grenoble INP.
- EL HADJ KHALAF, R., AGARD, B. et PENZ, B. (2010). An experimental study for the selection of modules and facilities in a mass customization context. Journal of Intelligent Manufacturing, 21, 703–716.
- EL HADJ KHALAF, R., AGARD, B. et PENZ, B. (2011). Module selection and supply chain optimization for customized product families using redundancy and standardization. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 8, 118–129.
- ELMARAGHY, H. et MAHMOUDI, N. (2009). Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 22, 483–493.

- FERDOWS, K. (1997). Making the most of foreign factories. Harvard Business Review.
- FIXSON, S. K. (2007). Modularity and commonality research : Past developments and future opportunities. Concurrent Engineering, 15, 85–111.
- FOURNIER, X. et AGARD, B. (2007). Improvement of earliness and lateness by postponement on an automotive production line. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 19, 107–121.
- FROTA NETO, J., BLOEMHOF-RUWAARD, J., VAN NUNEN, J. et VAN HECK, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. International Journal of Production Economics, 111, 195–208.
- GEOFFRION, A. M. et GRAVES, G. W. (1974). Multicommodity distribution system design by benders decomposition. Management Science, 20, 822–844.
- GUPTA, S. et KRISHNAN, V. (1999). Integrated component and supplier selection for a product family. Production and Operations Management, 8, 163–182.
- HADJ HAMOU, K. (2002). Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes. Thèse de doctorat, INP Toulouse.
- HAMMAMI, R., FREIN, Y. et HADJ-ALOUANE, A. (2008). Supply chain design in the delocalization context : Relevant features and new modeling tendencies. International Journal of Production Economics, 113, 641–656.
- HAMMAMI, R., FREIN, Y. et HADJ-ALOUANE, A. B. (2009). A strategic-tactical model for the supply chain design in the delocalization context : Mathematical formulation and a case study. International Journal of Production Economics, 122, 351–365.
- JIAO, J., SIMPSON, T. et SIDDIQUE, Z. (2007). Product family design and platform-based product development : a state-of-the-art review. Journal of Intelligent Manufacturing, 18, 5–29.
- JOHNSON, M. et KIRCHAIN, R. (2010). Developing and assessing commonality metrics for product families : A process-based cost-modeling approach. IEEE Transactions on Engineering Management, 57, 634–648.
- KLIBI, W., MARTEL, A. et GUITOUNI, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks : A critical review. European Journal of Operational Research, 203, 283–293.

- KOIKE, T. (2005). Les interfaces pour l'intégration de la logistique dans les projets de conception. une contribution basée sur le cas du projet d'un tracteur à chenille. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- KUSIAK, A. et HUANG, C. C. (1996). Development of modular products. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, 19, 523–538.
- LAMOTHE, J., BONNAFE, A., GORGAS, M., DUPONT, L. et ALDANONDO, M. (2008). Expérimentation d'un modèle de conception d'une famille de produits et de sa chaîne logistique. Proceedings of 7ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation-MOSIM. Paris, France.
- LAMOTHE, J., HADJ-HAMOU, K. et ALDANONDO, M. (2006). An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. European Journal of Operational Research, 169, 1030–1047.
- LAU, A. K. W., YAM, R. C. M., TANG, E. P. Y. et SUN, H. Y. (2010). Factors influencing the relationship between product modularity and supply chain integration. International Journal of Operations & Production Management, 30, 951–977.
- LEE, H. et TANG, C. (1997). Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation. Management Science, 43, 40–53.
- LIANG, D. et WILHELM, W. (2008). Decomposition schemes and acceleration techniques in application to production-assembly-distribution system design. Computers & Operations Research, 35, 4010–4026.
- LIN, J.-R., NOZICK, L. et TURNQUIST, M. (2006). Strategic design of distribution systems with economies of scale in transportation. Annals of Operations Research, 144, 161–180.
- LOWSON, R. (2001). Offshore sourcing : An optimal operational strategy? Business Horizons, 44, 61–66.
- LUO, X., KWONG, C., TANG, J., DENG, S. et GONG, J. (2011). Integrating supplier selection in optimal product family design. International Journal of Production Research, 49, 4195–4222.
- MANSOORNEJAD, B., CHAMBOST, V. et STUART, P. (2010). Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. Computers & Chemical Engineering, 34, 1497–1506.

- MANZINI, R. et BINDI, F. (2009). Strategic design and operational management optimization of a multi stage physical distribution system. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 45, 915–936.
- MARTEL, A. (2005). The design of production-distribution networks : A mathematical programming approach. Supply Chain Optimization. 265–305.
- MEIXELL, M. et GARGEYA, V. (2005). Global supply chain design : A literature review and critique. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 41, 531–550.
- MELO, M., NICKEL, S. et SALDANHA-DA-GAMA, F. (2006). Dynamic multi-commodity capacitated facility location : a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. Computers & Operations Research, 33, 181–208.
- MELO, M., NICKEL, S. et SALDANHA-DA-GAMA, F. (2009). Facility location and supply chain management - a review. European Journal of Operational Research, 196, 401–412.
- MOHAMMADI BIDHANDI, H. et MOHD YUSUFF, R. (2011). Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach. Applied Mathematical Modelling, 35, 2618–2630.
- MOHAMMADI BIDHANDI, H., MOHD YUSUFF, R., MEGAT AHMAD, M. et ABU BAKAR, M. (2009). Development of a new approach for deterministic supply chain network design. European Journal of Operational Research, 198, 121–128.
- MONTREUIL, B. et POULIN, M. (2005). Demand and supply network design scope for personalized manufacturing. Production Planning & Control, 16, 454 – 469.
- NARAHARISSETTI, P., KARIMI, I. et SRINIVASAN, R. (2008). Supply chain redesign through optimal asset management and capital budgeting. Computers & Chemical Engineering, 32, 3153–3169.
- NEPAL, B., MONPLAISIR, L. et FAMUYIWA, O. (2012). Matching product architecture with supply chain design. European Journal of Operational Research, 216, 312–325.
- PAQUET, M. (2007). Optimisation de l'ingénierie de réseaux manufacturiers. Thèse de doctorat, Université Laval.
- PAQUET, M., MARTEL, A. et DESAULNIERS, G. (2004). Including technology selection decisions in manufacturing network design models. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 17, 117–125.



- PAQUET, M., MARTEL, A. et MONTREUIL, B. (2008). A manufacturing network design model based on processor and worker capabilities. International Journal of Production Research, 46, 2009–2030.
- PEIDRO, D., MULA, J., POLER, R. et LARIO, F. (2009). Quantitative models for supply chain planning under uncertainty : a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 43, 400–420.
- PINE, B. J. (1993). Mass customization : The new frontier in business competition. Harvard business school press.
- PIRARD, F. (2005). Une démarche hybride d'aide à la décision pour la reconfiguration et la planification stratégique des réseaux logistiques des entreprises multi-sites. Thèse de doctorat, Facultés universitaires catholiques de Mons.
- POULIN, M., MONTREUIL, B. et MARTEL, A. (2006). Implications of personalization offers on demand and supply network design : A case from the golf club industry. European Journal of Operational Research, 169, 996–1009.
- RAMDAS, K. et RANDALL, T. (2008). Does component sharing help or hurt reliability ? an empirical study in the automotive industry. Management Science, 54, 922–938.
- RIOPEL, D., LANGEVIN, A. et CAMPBELL, J. (2005). The network of logistics decisions. Logistics Systems : Design and Optimization, Springer US. 1–38.
- RIOPEL, D., LANGEVIN, A. et CAMPBELL, J. F. (1998). Integrating logistics in concurrent product and process design. Cahiers du GERAD.
- ROMEIJN, H., SHU, J. et TEO, C.-P. (2007). Designing two-echelon supply networks. European Journal of Operational Research, 178, 449–462.
- SALVADOR, F., FORZA, C. et RUNGTUSANATHAM, M. (2002). Modularity, product variety, production volume, and component sourcing : theorizing beyond generic prescriptions. Journal of Operations Management, 20, 549–575.
- SALVADOR, F., RUNGTUSANATHAM, M. et FORZA, C. (2004). Supply-chain configurations for mass customization. Production Planning & Control, 15, 381 – 397.
- SCHULZE, L. et LI, L. (2009a). Location-allocation model for logistics networks with implementing commonality and postponement strategies. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2, 1615–1620.

- SCHULZE, L. et LI, L. (2009b). A logistics network model for postponement supply chain. International Journal of Applied Mathematics, 39.
- SHAFIA, M. A., ARIYANEZHAD, M. G., FATHOLLAH, M. et TAHAM, F. (2009). Supply chains based on common platforms : Analysis of time savings gained by commonality. Journal of Applied Sciences, 9, 27–37.
- SHAPIRO, J. F. (2001). Modeling the supply chain. Duxbury Resource Center.
- SHIMIZU, Y., FUSHIMI, H. et WADA, T. (2011). Robust logistics network modeling and design against uncertainties. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 5, 103–114.
- SIMPSON, T. W., SIDDIQUE, Z. et JIAO, J. (2006). Product platform and product family design : methods and applications. Springer, New York.
- STADZISZ, P. C. et HENRIOUD, J. M. (1998). An integrated approach for the design of multi-product assembly systems. Computers in Industry, 36, 21–29.
- SU, J. C., CHANG, Y. L. et FERGUSON, M. (2005). Evaluation of postponement structures to accommodate mass customization. Journal of Operations Management, 23, 305–318.
- TANG, J., YUNG, K.-L. et IP, A. (2004). Heuristics-based integrated decisions for logistics network systems. Journal of Manufacturing Systems, 23, 1–13.
- THANH, P. N., BOSTEL, N. et PETON, O. (2008). A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. International Journal of Production Economics, 113, 678–693.
- THANH, P. N., PETON, O. et BOSTEL, N. (2010). A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design. Computers & Industrial Engineering, 59, 964–975.
- THEVENOT, H. et SIMPSON, T. (2006). Commonality indices for assessing product families. Product platform and product family design : methods and applications, Springer, New York.
- THONEMANN, U. W. et BRANDEAU, M. L. (2000). Optimal commonality in component design. Operations Research, 48, 1–19.
- TUKKER, A. et JANSEN, B. (2006). Environmental impacts of products : A detailed review of studies. Journal of Industrial Ecology, 10, 159–182.

- VERTER, V. et DASCI, A. (2002). The plant location and flexible technology acquisition problem. European Journal of Operational Research, 136, 366–382.
- VILA, D., BEAUREGARD, R. et MARTEL, A. (2005). The strategic design of forest industry supply chains. Document de travail du CENTOR DT-2005-RB-2, Université Laval, Québec, Canada.
- VILA, D., MARTEL, A. et BEAUREGARD, R. (2006). Designing logistics networks in divergent process industries : A methodology and its application to the lumber industry. International Journal of Production Economics, 102, 358–378.
- WACKER, J. et TRELEVEN, M. (1986). Component part standardization : An analysis of commonality sources and indices. Journal of Operations Management, 6, 219–244.
- WANG, F., LAI, X. et SHI, N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. Decision Support Systems, 51, 262–269.
- YAN, H., YU, Z. et EDWIN CHENG, T. (2003). A strategic model for supply chain design with logical constraints : formulation and solution. Computers & Operations Research, 30, 2135–2155.
- ZHANG, X., HUANG, G., HUMPHREYS, P. et BOTTA-GENOULAZ, V. (2010). Simultaneous configuration of platform products and manufacturing supply chains : comparative investigation into impacts of different supply chain coordination schemes. Production Planning & Control, 21, 609.
- ZHANG, X., HUANG, G. Q. et RUNGTUSANATHAM, M. J. (2008). Simultaneous configuration of platform products and manufacturing supply chains. International Journal of Production Research, 46, 6137–6162.

## ANNEXE A

### PARTENARIAT INDUSTRIEL AVEC REYES CONSTRUCTIONS

#### Contexte de l'étude

La problématique de cette thèse émane d'un problème industriel de la société *Reyes Constructions* (RC), une PME française spécialisée dans l'assemblage de produits électro-mécaniques. L'entreprise possède trois sites de production situés en région Rhône-Alpes et compte environ 250 employés pour un chiffre d'affaire de 25 millions d'euros. Sa production se fait exclusivement en position de sous-traitant, et se répartit entre des contrats de produits uniques ou de petites séries et des contrats de moyennes séries – de l'ordre d'une dizaine de milliers de produits au maximum.

Notre partenariat concerne l'acquisition en 2008 d'un site de production en Tunisie. Ce site s'inscrit dans une volonté de proposer à leurs clients une offre à bas coût de main d'œuvre. Cette décision stratégique a été prise dans le but de donner un signal important sur les capacités de RC à proposer des services concurrentiels. Cependant, l'entreprise ne possède pas d'expertise quant aux choix d'allocation des produits à fabriquer sur des sites de production possédant des caractéristiques différentes et impliquant des coûts logistiques importants. Notre rôle est de proposer une méthodologie permettant de déterminer la chaîne logistique à utiliser pour un contrat donné. La chaîne logistique de RC pour un contrat donné est définie de façon générique en Figure A.1. Nous considérons les acteurs suivants :

**Le site “local”** regroupe les sites français de l'entreprise. Ces sites ne sont pas spécialisés et sont près les uns des autres. Les clients sont proches du site local ;

**Le site “distant”** le site tunisien. Le coût de la main d'œuvre est plus bas, mais les coûts d'implantation d'une ligne de production sont plus élevés principalement à cause du coût de formation ;

**Les clients** sont les clients finaux ou le donneur d'ordre. Le donneur d'ordre peut fournir les composants aux sites de productions ;

**Les fournisseurs** peuvent être imposés par le client ou gérés par RC.

L'objectif est de pouvoir déterminer l'allocation des produits aux sites de production. Le type de solution attendue est illustré en Figure A.2.

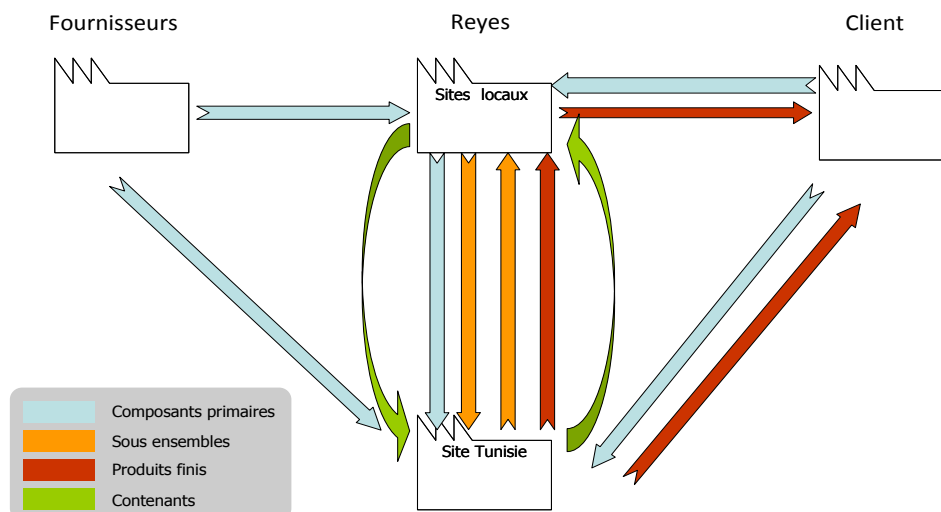


Figure A.1 Chaîne logistique générique de Reyes Constructions.

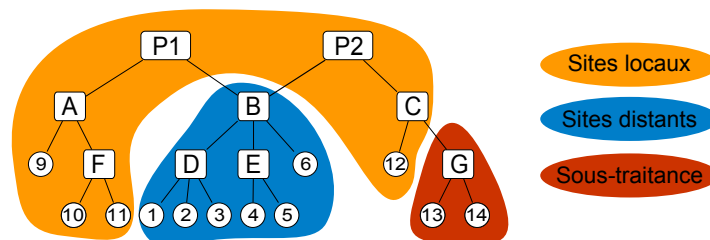


Figure A.2 Type de solution attendue par Reyes Constructions.

Le souhait de l'entreprise était de disposer d'un outil à la décision flexible permettant de s'adapter aux évolutions de l'entreprise (autres sites de production par exemple).

## Développement et résultats

Le logiciel CICLAD (Conception Intégrée de la Chaîne Logistique – Aide à la Décision) a été développé sous MS Excel 2007. Il utilise les bibliothèques Ipsolve 5.7 pour la modélisation et la résolution du programme linéaire en nombre entier. Seule la partie optimisation de la chaîne logistique a été implantée de part la décision de l'entreprise de se concentrer sur cette partie.

La figure A.3 montre l'écran d'accueil du logiciel, permettant d'accéder à toutes les autres pages et de lancer les calculs.

La figure A.4 présente une fenêtre d'entrée des données, en l'occurrence celle pour entrer les caractéristiques des produits.

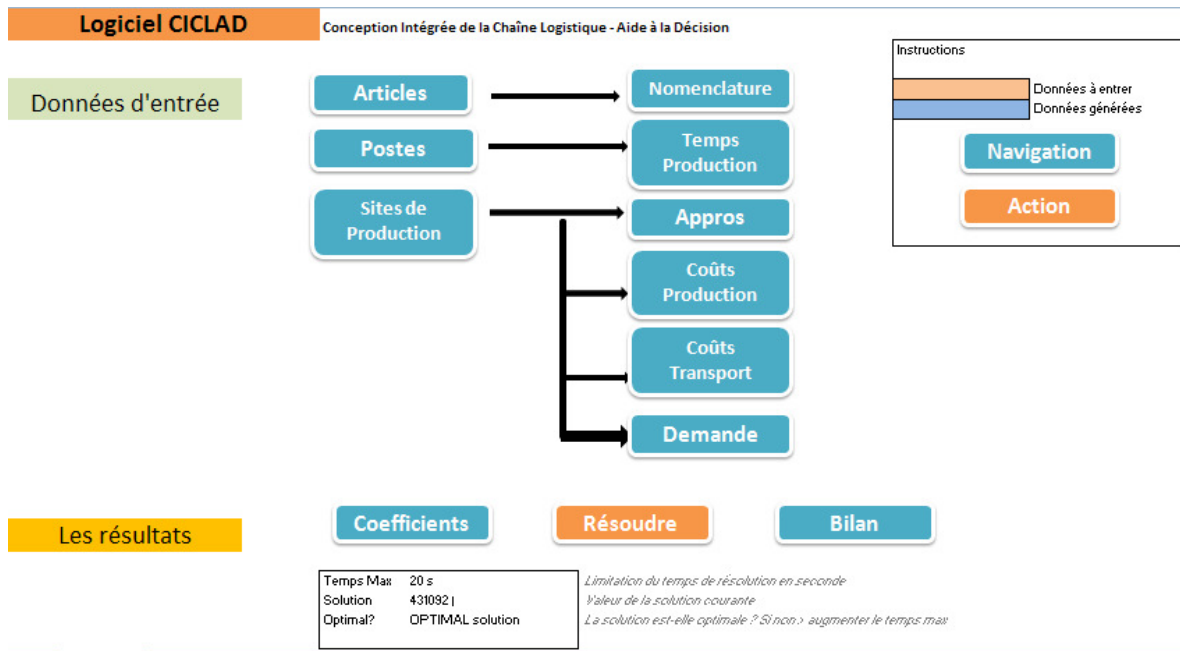


Figure A.3 Page d'accueil du logiciel.

**Produits**

Nombre de lignes	10
produit fini	2
sous ensemble	3
composant	5

Accueil Nomenclature

Actualiser Demandes

Insérer Supprimer

**Instructions**

- 1) Entrer la liste des parties du / des produits
- 2) Spécifier pour chaque partie le champ type : produit fini, sous ensemble, ou composant
- 3) Actualiser
- 4) Entrer les volumes en m3 (volume de transport unitaire)

Réf	Type	Désignation	Référence	volume	Demandes totales
F1	produit fini	Produit 1	Ref 1	1,00 m3	2500
F2	produit fini	Produit 2	Ref 2	0,50 m3	600
M1	sous ensemble	s-e A	Ref 3	0,03 m3	600
M2	sous ensemble	s-e B	Ref 4	0,01 m3	5000
M3	sous ensemble	s-e C	Ref 5	0,05 m3	3100
R1	composant	Lot P1	Ref 6	0,15 m3	2500
R2	composant	Lot P2	Ref 7	0,01 m3	600
R3	composant	Lot SE-A	Ref 8	0,02 m3	600
R4	composant	Lot SE-B	Ref 9	0,01 m3	5000
R5	composant	Lot SE-C	Ref 10	0,15 m3	3100

Figure A.4 Entrée des caractéristiques des produits.

La figure A.5 affiche la solution de l'optimisation en répartissant les différentes composantes du coût.

Le logiciel s'adapte aux nombres de sites de production et aux nombres de produits, assemblages et composants à traiter. Les temps de résolution sont très courts sur les cas d'études réels que nous avons testés. Sur deux études de cas, l'évaluation faite par le logiciel

Bilan

Accueil

Coefficients

Le détail

Quantités à approvisionner

Quantités à fabriquer

les options à utiliser

Quantités à transporter

Coût total de décision	Coût d'appro	Coût de prod	Coût tech	Coût transport Prestataire	Coût MO lié aux transports	Coût fixe
431 092 €	- €	403 080 €	- €	20 250 €	7 762 €	- €

répartition	UP1	UPT
Coût appro	0 €	0 €
Coût prod	305 400 €	97 680 €
Coût tech	0 €	0 €
heures de producti	10180 h	6105 h

Figure A.5 Bilan de la solution.

est proche des estimations provenant d'autres méthodes d'évaluation.